



UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA

TESIS DOCTORAL

**DISEÑO, FABRICACIÓN Y ENSAYO DE ESTRUCTURAS
AUTODESPLEGABLES DE PROTECCIÓN AL VUELCO
(AD-ROPS)**

Autor:

D. Tomás Ballesteros Egüés

Directores

Dr. D. Ignacio Arana Navarro

Dr. D. José Ramón Alfaro López

Tudela, Mayo de 2015

0.1. INDICE

0. INDICE GENERAL	
0.1. Indice	i
0.2. Agradecimientos	vi
0.3. Dedicatoria	vii
1. RESUMEN	1
1.1. Resumen	1
1.2. Abstract	2
2. OBJETIVOS	4
3. REVISION BIBLIOGRAFICA	7
3.1. Siniestrabilidad en el sector agrario	7
3.2. El vuelco del tractor	8
3.2.1. Acciones para limitar el riesgo de vuelco	11
3.3. Las estructuras de protección al vuelco	14
3.3.1. Tipos de ROPS	17
3.3.2. Las normas y códigos de ensayo de las ROPS montadas en los tractores	19
3.3.2.1. Los códigos de la OCDE	23
3.3.2.1.1. El Código 3	23
3.3.2.1.2. El Código 4	25
3.3.2.1.3. El Código 6	27
3.3.2.1.4. El Código 7	31
3.3.2.1.5. El Código 8	32
3.3.2.2. Las directivas CEE	33
3.3.2.2.1. La Directiva 77/536/CEE	33
3.3.2.2.2. La Directiva 77/622 CEE	34
3.3.2.2.3. La Directiva 86/298 CEE	34
3.3.2.2.4. La Directiva 87/402/CEE	35
3.3.2.2.5. Equivalencia entre las directivas CE y los códigos de la OCDE	37
3.3.2.3. Las normas SAE	37
3.3.2.3.1. La norma SAE J1194	37

3.3.2.3.2. La norma SAE J2194	39
3.3.2.4. Comparación de los distintos códigos y normas de ensayo	40
3.3.2.5. Consideraciones y propuestas de mejora	46
3.3.3.El diseño de las ROPS	50
3.3.4.Los arcos de seguridad de los tractores	59
3.3.4.1. La zona de supervivencia y el criterio de exposición	60
3.3.4.2. Los arcos de seguridad abatibles	61
3.3.4.3. La asistencia a la puesta en posición operativa de los arcos de seguridad abatibles	64
3.3.4.4. Los arcos de seguridad automontantes	70
3.4. Los cinturones de seguridad	74
3.4.1. Tipos de cinturones de seguridad	76
3.4.1.1. Cinturones de dos puntos	76
3.4.1.2. Cinturones de tres puntos	79
3.4.2. Incorporación del cinturón en tractores provistos de ROPS	79
3.4.3. Normas aplicables a los cinturones de seguridad	81
3.4.4. Elevación de los cinturones de seguridad	83
3.5. Los sistemas de activación de las ROPS desplegadas automá- ticamente (AD-ROPS)	83
3.6. Simuladores de vuelco	84
3.7. Patologías producidas en accidentes de tractores	91
4. METODOS	92
4.1. Diseño de la ROPS	92
4.1.1. Tractores	92
4.1.2. Diseño del E2D-ROPS	94
4.1.2.1. Material empleado en el E2D-ROPS	94
4.1.2.2. El E2D-ROPS en su posición operativa	95
4.1.2.3. El E2D-ROPS en su posición replegada	97
4.1.2.4. Tamaño y forma del E2D-ROPS	98
4.1.2.5. Sistema de despliegue y bloqueo	101
4.1.3. Software utilizado para el desarrollo del E2D-ROPS	101
4.2. Universalización del diseño e ingeniería de las AD-ROPS	104
4.2.1. Diseño de las AD-ROPS	104
4.2.2. Infladores de airbag	105

4.2.3. Ensayos de las ROPS	108
4.2.3.1. Ensayos con aire comprimido	108
4.2.3.2. Pruebas de desarrollo utilizando infladores airbag	108
4.2.3.3. Ensayos de vuelco real	109
4.2.3.4. Ensayos de las AD-ROPS de acuerdo con la metodología Código 6	110
4.2.4. Software para analizar la idoneidad de las AD-ROPS	111
4.3. Sistema de activación del E2D-ROPS	111
4.3.1. Sensores	113
4.3.1.1. Sensor de ángulo de inclinación del tractor	113
4.3.1.2. Sensor de presencia del tractorista en el asiento del tractor	114
4.3.1.3. Sensor de cinturón	115
4.3.1.4. Interruptor de encendido	115
4.3.1.5. Sensor de operatividad del mecanismo de disparo	116
4.3.2. Microcontrolador	116
4.3.2.1. Sistema BX-24	116
4.3.2.2. Sistema LCDX	119
4.3.2.3. Placa de control Mini Atom Board S310162	120
4.3.3. Sistema de indicadores y actuadores	122
4.3.3.1. Indicadores de operatividad y alarma	122
4.3.4. Activación del sistema	123
4.3.4.1. Activación del inflador de airbag	123
4.3.4.2. Activación de los sistemas auxiliares de localización y aviso	124
5. RESULTADOS Y DISCUSION	126
5.1. Fabricación del E2D-ROPS	126
5.1.1. Elección de las dimensiones del E2D-ROPS	126
5.1.2. Selección de la sección de los tubos del E2D-ROPS	127
5.1.2.1. Análisis para el tractor John Deere	128
5.1.2.2. Análisis para el tractor Kubota	133
5.1.2.3. Diseño de los tubos telescópicos para la construcción del E2D-ROPS	135
5.1.2.4. Diseño del sistema de bloqueo	136
5.2. Ensayos de despliegue del E2D-ROPS	138

5.2.1. Ensayos con aire comprimido	138
5.2.2. Ensayos realizados con infladores pirotécnicos para airbag	139
5.3. Ensayos con las AD-ROPS	144
5.3.1. Selección del número, tamaño y ubicación de los infladores para desplegar las AD-ROPS	144
5.4. Evaluación de los modelos de tractores en los cuales es posible instalar un determinado tipo de AD-ROPS para asegurar un resultado positivo en los ensayos del Código 6	148
5.4.1. Resultados del ensayo en las AD-ROPS realizados en la EMA	150
5.4.2. Modificación de los parámetros del modelo de tractor para asegurar un resultado positivo en los ensayos según Código 6	152
5.4.3. Determinación del lugar geométrico del punto de fijación de la AD-ROPS para asegurar un resultado positivo en los ensayos según el Código 6	156
5.4.4. Montaje de la AD-ROPS en vehículos distintos a los tractores	166
5.5. Sistema de activación de las AD-ROPS	167
5.5.1. Sensor de presencia del conductor en el asiento	169
5.5.2. Interruptor de encendido	169
5.5.3. Verificador de continuidad en la línea de activación del inflador	170
5.5.4. Microcontroladores	170
5.5.5. Algoritmo de control	171
5.5.5.1. Esquema de conexión del sistema	172
5.5.5.2. Diagrama de bloque	174
5.5.5.3. Bloque de arranque	175
5.5.5.4. Bloque de conductor	176
5.5.5.5. Bloque de detección de vuelco	178
5.5.5.6. Bloque de activación	180
5.5.6. Sistemas complementarios de alarma	182
5.6. Resultado de los ensayos	183
5.6.1. Pruebas realizadas con el microprocesador BX-35	184
5.6.2. Pruebas realizadas en laboratorio con el inclinando	187
5.6.3. Pruebas realizadas en quad con el inclinando	189
6. CONCLUSIONES	192
7. LINEAS DE INVESTIGACION	194

ANEXOS

ANEXO 1. Listado de tablas y figuras

ANEXO 2. Bibliografía

ANEXO 3. *Development and tests of an automatically deployable, in height and width, front-mounted ROPS for narrow-track tractors*

Biosystems Engineering

ANEXO 4. Premio EurAgEng Outstanding Awards 2014 por artículo

ANEXO 5. *Development and validation of automatically deployable ROPS (AD-ROPS) based on airbag inflators technology*

Biosystems Engineering

0.2. AGRADECIMIENTOS

Es mucha gente a la que tengo que agradecer su cooperación en haber podido desarrollar esta tesis doctoral

En primer lugar a mi director de tesis, Ignacio, ya que además de lo puramente técnico, me ha guiado y ayudado, animándome en los momentos más complicados durante la realización de la tesis y enseñándome la forma adecuado de escribir los artículos.

También debo agradecer a mi co-director, José Ramón, por ayudarme en el arranque inicial de la tesis, la más complicada de todas, en particular en lo referente al análisis con elementos finitos y facilitándome toda la documentación técnica para poder desarrollarla

No debo dejar de incluir a mis compañeros del Dpto. de Proyectos e Ingeniería Rural, que siempre han estado resolviendo las dudas que tuviera y mostrando su colaboración y apoyo

Al personal del campus de Tudela, en particular a Anabel, Angel y Mitxelko, a los cuales no siempre se les agradece su trabajo y su esfuerzo pero que son auténticos sostén de todos los que hacemos proyectos en ese campus

A los miembros de la empresa AIR-ROPS los cuales siempre han mostrado un gran interés y apoyo por los resultados de esta tesis, facilitando en muchos casos los medios para poder desarrollar los distintos ensayos

Por último a todas aquellas personas que han colaborado en la realización de esta tesis cuando se les ha solicitado ayuda o bien han facilitado el camino.

0.3. DEDICATORIA

En primer lugar quiero dedicar de forma póstuma a mi madre, la cual estaba totalmente ilusionada con la tesis y por circunstancias del destino no pudo ver finalizada, si bien estuvo en todo momento a mi lado.

También quiero dedicárselo a mi familia, Cesar, Carmen, Yaya, Enrique, Ana...los cuales en los momentos más complicados y felices de mi vida han estado a mi lado.

No debo olvidar a la familia Hernández de Guipúzcoa que han sido como una segunda familia para mí y me enseñaron lo que era importante en la vida.

A mis amigos los cuales han estado apoyándome y estando a mi lado en todos aquellos momentos en los cuales me veían encerrado con la tesis.

A todos los voluntarios y compañeros de los equipos de emergencia, tales como Cruz Roja, Protección Civil, ISEM-UME, entre otros, que dedican su tiempo libre para ayudar a todas aquellas personas que sufren un accidente o en caso de una emergencia, y de los cuales sólo nos acordamos en los momentos de necesidad pero no en el día a día

Eppur si muove

1. RESUMEN

1.1. Resumen

La principal causa de muerte en la agricultura es el vuelco de los tractores que carecen de ROPS. En general las barras antivuelco que están montados frontalmente en los tractores pequeños suelen ser plegables para poder ser utilizados en situaciones de falta altura libre sobre el tractor. La mayoría de los accidentes fatales que involucran a los tractores con ROPS plegables se deben a que, en el momento del vuelco, la ROPS se encontraba en la posición plegada y no operativa.

En esta tesis se desarrolla una ROPS de despliegue automático, diseñado principalmente para tractores estrechos, utilizando infladores de airbag, capaces de aumentar al mismo tiempo la altura y la anchura superior de la estructura.

Esta estructura, denominada E2D-ROPS, ha sido diseñada, construida y ensayada, comprobándose que esta configuración reduce el riesgo de rodadura continua, aumenta la zona de seguridad en caso de vuelco lateral y permite una mayor flexión en las secciones críticas, por lo que el tamaño de las vigas puede reducirse. Utilizando un programa de elementos finitos, se ha calculado el tamaño de sus vigas, teniendo en cuenta la masa de los tractores en que puede ser instalada, para garantizar un resultado positivo de los ensayos del Código 6.

En una segunda fase se analizaron unas estructuras basadas en el E2D-ROPS, denominadas AD-ROPS, diseñaron para unas masas de hasta 500, 1000 y 2500 kg, de tal forma que pudieran ser compatibles con la mayor parte de los tractores. Estas estructuras fueron ensayadas en una Estación de Ensayos y los resultados han sido utilizados para prever los resultados de los ensayos del Código 6 que pudieran ser realizados sobre tractores equipados con estas ROPS.

Se ha diseñado un sistema de control para su activación, denominado “inclinando”, estableciendo varias premisas de funcionamiento y se han desarrollado los algoritmos de control. Este dispositivo cuenta con varios sensores que minimizan la posibilidad de un falso positivo o falso negativo.

En las distintas pruebas realizadas se analizaron los tiempos de activación y despliegue de la estructura, comprobándose que en el caso de dos airbag en el interior del E2D-ROPS, y al alcanzar una inclinación de 60°, el sistema se desplegaba y bloqueaba en su posición operativa en 102 ms, mientras que si sólo se activaba uno, este tiempo se incrementaba hasta los 312 ms, tiempo muy inferior al considerado necesario para un vuelco de estas características, que es de 750 ms, por lo que se evidencia que el sistema funciona de forma apropiada.

Se realizó una prueba de vuelco real con un quad comprobándose que el sistema se desplegaba de forma adecuada en un tiempo suficientemente corto y que el conductor estaría correctamente protegido si permanece en su asiento con la cabeza apoyada sobre el volante.

1.2. Abstract

The main cause of death in agriculture is the overturn of tractors lacking ROPS. Front mounted roll bars usually are foldable to be used in low clearance situations. Most of fatal accidents involving tractors with foldable ROPS occur because, at the moment of the overturn, the ROPS were at the lower position. In this research an automatically deployable front-mounted ROPS for narrow tractors, using airbag inflators able to increase simultaneously the height and the upper width of the ROPS, was designed, manufactured and tested. The name given to this ROPS is Ejectable in Two Dimensions ROPS (E2D-ROPS). It has been possible to check that double change of the ROPS geometry reduces continuous rolling risk, increases the safe zone in a lateral direction; besides, it allows the reduction of the ROPS height, the bending moments at critical sections and the ROPS beams sections. Using a Finite Elements computer program, the necessary sections for E2D-ROPS to be mounted in two tractor models, ensuring a positive result of code 6 tests, were calculated using different reference masses.

Three AD-ROPS, based on this prototype, were designed to be mounted on tractors having masses up to 500, 1000, and 2500 kg. These ROPS were tested in the Spanish Station for testing ROPS, and the obtained data were used to predict the Code 6 test results for tractors equipped with these ROPS.

A control system, named “inclinando”, has been designed to activate these AD-ROPS. It includes an algorithm and sensors for minimizing the false positives and false negatives.

Deployment and lockage time for the different ROPS have been measured and evaluated. It has been checked that, using two airbag inflators, it has been possible to deploy and lock the E2D-ROPS in 102 ms, when its inclination angle reached 60° whilst using only one inflator this deployment and lockage time was 312 ms. In both cases, the time is shorter than the overturn time, which is about 750 ms and, therefore, the system works correctly.

A real overturn test was performed using a quad. The ROPS was deployed and locked properly and the operation time was quick enough to ensure the driver was effectively protected in the event of a side overturn, provided that the driver remains in his seat with the safety belt fastened and resting his head on the steering wheel.

2. OBJETIVOS

El objetivo de esta tesis es reducir las tasas de accidentabilidad y de mortalidad en el sector agrícola, mediante la eliminación de uno de los riesgos más importantes de este sector que es el vuelco del tractor cuando su arco de seguridad está en posición plegada y no operativa. Para ello, se va a diseñar, desarrollar, fabricar, optimizar y ensayar un nuevo tipo arco de seguridad (ROPS), de despliegue y bloqueo automático e instantáneo, activado por un sistema de control digital y desplegado mediante uno o dos infladores de airbag, variando su geometría en dos dimensiones, altura y anchura. La vamos a denominar E2D-ROPS que es un acrónimo inglés (Ejectable in two Dimensions – Roll Over Protection Structure)

Para ello se va a diseñar una estructura, telescópica desplegable, que disponga en su interior de uno o dos infladores de airbag, de tal manera que, cuando sean activados, se produzca la emisión de un gas, en el interior de la estructura que aumente el volumen de este espacio interior empujando sus partes móviles y desplegando y bloqueando la estructura en su posición más alta y más ancha, que es la posición operativa. El despliegue y bloqueo debe realizarse en un tiempo inferior al tiempo de vuelco de un tractor (750 ms)

Como el despliegue en dos dimensiones incrementa la zona de seguridad, se puede diseñar la estructura de forma que sea más flexible, lo que permitiría una mayor deformación (con lo que obviamente la energía absorbida por la misma sería mayor) y en este caso la desaceleración para el tractorista sería menor, con lo que la posibilidad de lesiones se minimizaría ya que amortiguaría el impacto y sería menos brusco. Esta flexibilidad también se conseguiría disminuyendo la masa del E2D-ROPS, con lo que la necesidad de tamaño del airbag no sería excesivo, consiguiendo con ello un objetivo secundario de disminución del coste de su fabricación.

También se pretende analizar los distintos diseños y tamaños de las vigas que componen la estructura, utilizando técnicas de elementos finitos, para desarrollar estructuras de protección al vuelco automáticamente desplegables (AD-ROPS) que puedan ser instaladas en diferentes modelos de tractor con diferentes masas y dimensiones.

Al estar la estructura en situación plegada de forma normal, se evitará que el conductor tenga que participar en su activación, pasando a ser un sistema de seguridad pasivo, con lo que siempre estaría en posición de actuar.

Además de este objetivo, se desarrollará un sistema de activación para el E2D-ROPS, al cual se denominará “inclinando”, el cual detectará, sobre la base de una serie de algoritmos, la posibilidad de vuelco del vehículo, integrando para ello tres sensores de vuelco, con lo que se minimiza la posibilidad, por error u avería, de que se den falsos positivos o falsos negativos. Este sistema es digital, por lo que se podrá programar en función de la distinta legislación existente en el país, ya que dispondrá de sensores en el asiento y en el cinturón por lo que en el caso de que el conductor no llevara abrochado correctamente el mismo, se podrán tomar distintas alternativas.

Ya que el E2D-ROPS tiene que cumplir la normativa, se realizarán ensayos parciales de deformación utilizando la legislación comunitaria Código 6 (en inglés Code 6), y para ello se construirá una estructura y se llevará a ensayar a la EMA (estación de ensayo homologada en España para este tipo de pruebas), con lo que se analizarán las curvas de deformación, observándose si cumple los criterios de aceptación en lo referente a este apartado.

También se utilizará un software en 3D para prever, a partir de los resultados obtenidos en los citados ensayos, el resultado de los ensayos del Código 6 que pudieran ser realizados con diferentes modelos de tractor equipados con las AD-ROPS ensayadas. De la misma forma se pretende utilizar esta misma técnica para variar el resultado de estos ensayos, de negativo a positivo, variando alguno de los parámetros que afectan a este resultado, como puede ser el tamaño y localización del punto duro trasero del tractor, la situación del SIP o el punto de acoplamiento de la AD-ROPS al tractor.

En particular, se pretende analizar el lugar geométrico de los puntos de acoplamiento del arco al tractor, que nos asegura un resultado positivo de los ensayos del Código 6 para una determinada AD-ROPS ensayada en la Estación de Ensayos, instalada en un determinado modelo de tractor. Además, se pretende establecer la parte de este lugar geométrico que nos asegura que la AD-ROPS cumple los requisitos relativos al campo de visión.

Esto permitiría definir el espacio en el cual es posible fijar el arco de tal forma que cumpla con todos los criterios, con el doble objeto de facilitar al fabricante la mejor localización del arco, y servir de base a una posible universalización de las ROPS que elimine la necesidad de un ensayo particular para cada combinación de ROPS-modelo de tractor.

3. REVISION BIBLIOGRAFICA

3.1. Siniestrabilidad en el sector agrario

La siniestrabilidad del sector agrario es una de las mayores, no sólo en España, sino en los países desarrollados y, todavía más, en los países emergentes. En los años sesenta en Suiza ocurrían de 10 a 20 muertes al año por vuelcos de tractores, en Dinamarca de 30 a 40, algo similar a lo que ocurría en Inglaterra, mientras que en Italia este número era muy elevado aunque todavía era mayor el registrado en Alemania en que el número de muertes por año ascendía a unos 200 (Gasparetto, 1968). En Italia, durante el período 1995-1999, hubo más de 6.000 accidentes con máquinas autopropulsadas y el 1% de ellos fue mortal (INAIL, 2000), mientras que en 1999 ocurrían en España más de diez accidentes mortales en los que se veía involucrada maquinaria agrícola (Barco, 1999). En los Estados Unidos de América la agricultura es el segundo sector en número de accidentes de trabajo sólo superado por el transporte por carretera (Bureau of Labor Statistics, 2000) y en dicho país cada año mueren unos 250 trabajadores en accidentes de tractor (NIOSH, 2004). Además es en este país donde el sector agrario tiene el más alto ratio de mortalidad a causa de accidentes con 24,11 accidentes mortales por cada 100.000 trabajadores/año que es más de cinco veces la mortalidad en el conjunto de los sectores.

Debido a la falta de disponibilidad de suficientes datos fiables relativos a los accidentes agrícolas es difícil planificar estrategias para prevenir y evitar estos accidentes (Tiwari et al., 2004). Normalmente se carece de información básica sobre el número y las características de las personas heridas, así como de las causas y las consecuencias de los accidentes que son esenciales para confeccionar los programas de prevención.

Arana et al. (2010) realizaron un estudio sobre 388 accidentes mortales ocurridos en España de 2005 a 2008 y pudieron comprobar que tan solo el 61,85% de ellos tuvieron un carácter oficial por lo que los datos del resto no estaban disponibles para los técnicos en prevención. Pudieron comprobar que la gente mayor de 65 años es el grupo social con el riesgo de muerte más alto, lo que está de acuerdo con los trabajos de

Fenollosa et al. (2007), siendo éste un dato muy importante, ya que en España la población agrícola tiene una edad elevada, con lo que se aumenta el riesgo de muerte en el sector agrícola.

Estos mismos autores señalaron que la mayor parte de las muertes estaban relacionadas con el uso del tractor, lo que corrobora los estudios de Purschwitz Field (1990) quienes señalaron a los tractores como la principal causa de las muertes ocurridas en las explotaciones agrícolas, pues en un estudio realizado en siete estados de USA (Indiana, Pennsylvania, Kansas, Minnesota, Kentucky, Wisconsin y Nebraska) se comprobó que del 31% al 53% de los accidentes agrícolas mortales estaban relacionados con el tractor. En Carolina del Norte los muertos por accidente de tractor representaron el 43% de todos los accidentes laborales (Snizek et al. 1989) y el 62% de los accidentes agrícolas (Bernhardt y Langley, 1992).

3.2. El vuelco del tractor

Cassini-Ropa (1980) señaló que el vuelco del tractor era la principal causa de accidentes mortales en la agricultura, lo que fue corroborado et al. (1992), Myers y Snyder (1995), Freeman (1999) así como Bernhardt y Langley (1999). Un estudio del Instituto Nacional para la Seguridad e Higiene en el Trabajo de los Estados Unidos de América, realizado sobre 175 casos de vuelco de tractor demostró que el 60% de los accidentes tuvieron consecuencias leves, el 19% las tuvieron severas y el 21% fueron mortales. En 1991, casi el 31% de las muertes en el sector agrario estaban relacionadas con el manejo de los tractores y el 47% de estas muertes eran debidas al vuelco del tractor (National Safety Council, 1992).

En 1997, el Consejo Nacional de Seguridad estimó que alrededor de 200 trabajadores morían en USA, cada año, a causa del vuelco de tractor (NSC, 1997), lo que significaba que el número de accidentes mortales por vuelco de tractor no estaba reduciéndose significativamente. Murphy y Yoder (1998) publicaron que en USA más de la tercera parte de los accidentes agrícolas se produjeron con tractores. Gasparetto (2002) publicó que, según las estimaciones de las organizaciones de seguridad en el

trabajo, en la segunda mitad del siglo XX, entre el 20 y el 30% de los accidentes mortales en agricultura se deben al vuelco del tractor.

Gölbaşı (2002) señaló que en Turquía, entre 1990 y 2001, sucedieron 746 vuelcos de tractor y sólo el 18,36% de los tractores afectados por los vuelcos disponían de ROPS. El índice de mortalidad fue del 10,16% en los tractores equipados con ROPS, mientras que ascendió hasta el 33,90% en los que carecían de ella.

Myers (2003) señaló que todavía morían en USA más de 100 personas al año debido al vuelco del tractor. La oficina de trabajo y estadística de este país (Bureau of Labor and Statistics) publicó que entre 1992 y 2003 se produjeron en USA 2.869 muertes relacionadas con el tractor agrícola, 1.412 de ellas directamente relacionadas con el vuelco del tractor, lo que supone una media de 101 muertes al año por vuelco del tractor (Bureau of Labor Statistics, 2006).

En el año 2004, el NIOSH publicó que en USA, 250 trabajadores morían cada año en accidentes de tractor lo que representaba más de un tercio de las muertes totales en el sector agrario. Kamil et al. (2010) comprobaron que el 32% de los 86 accidentes mortales de tractor, ocurridos en Konya (Turquía) tuvieron como causa el vuelco del mismo.

Arana et al. (2010) realizaron un estudio sobre 388 accidentes mortales ocurridos en España entre los años 2005 a 2008 y concluyeron que el 88,39% de ellos estaba relacionado con el tractor y el 70,10% de estos accidentes mortales fue causado por su vuelco. De esta manera, en su evaluación de los principales riesgos en el sector agrario, estos autores concluyeron que el vuelco del tractor es el principal riesgo de muerte en el sector agrario.

Las causas del vuelco de los tractores son muy variadas y la velocidad del tractor no tiene por qué ser la principal de ellas porque los tractores trabajan a baja velocidad y se desplazan a velocidad moderada. En el estudio realizado por Arana et al. (2010), 113 de las 272 muertes debidas al vuelco de los tractores sucedieron en la carretera o en los caminos rurales, lo que supone un 41,5% de ellas, aunque no se puede asegurar que estos vuelcos se deban a una excesiva velocidad del tractor. En este mismo estudio se

puede comprobar que uno de cada cuatro vuelcos se produjo realizando una labor, lo que demuestra que el apero es, en muchas ocasiones, el que ocasiona el vuelco

Otra de las causas de vuelco son las elevadas pendientes que, según el citado estudio, fueron responsables del 15,44% de las muertes por vuelco. Este riesgo, provocado por las fuertes pendientes, se ve agravado por la existencia en el campo de socavones, agujeros y obstáculos, que hacen que cuando las ruedas del tractor pasan por encima de los obstáculos o caen en los socavones se produzca un aumento instantáneo de la inclinación, lateral o frontal, del tractor que se suma a la de la pendiente natural del terreno y aumenta en gran medida el citado riesgo. Chisholm (1972) ya publicó que la pérdida de estabilidad no se debía solamente a las pendientes sino a múltiples causas y señaló que más de la mitad de los vuelcos laterales sucedían cuando los tractores caían en socavones o pasaban por encima de obstáculos. Del estudio de Arana et al. (2010) se desprende que el 11% de los vuelcos mortales tuvieron esta última causa.

Los vuelcos pueden ser delanteros, traseros y laterales. El primero de ellos es poco habitual porque los tractores suelen tener el centro de gravedad desplazado hacia la parte trasera para aumentar su capacidad de tracción. Por esta razón se consideran, fundamentalmente, los vuelcos lateral y trasero.

El vuelco lateral supone el 90% de los vuelcos del tractor mientras que el trasero supone el 10% restante. El riesgo de vuelco lateral aumenta con la pendiente lateral, con la altura del centro de gravedad del tractor y con la reducción del ancho de vía, mientras que el riesgo de vuelco trasero aumenta con la pendiente ascendente, con la altura del centro de gravedad y con la reducción de la batalla del tractor (Alfaro, 2008). En el caso de vuelco lateral, el aumento del riesgo producido por los socavones y obstáculos es mayor que en el vuelco trasero, porque la anchura de los tractores suele ser menor que su batalla lo que aumenta, en mayor medida, la inclinación instantánea del tractor.

Arana et al. (2010) evaluaron los riesgos de vuelco de tractor y concluyeron que los factores de riesgo más importantes para el vuelco del tractor son los recogidos en la tabla 1, en la cual se clasifican por orden de importancia

Factor de riesgo	Nº de accidentes mortales
<i>Carencia de ROPS</i>	<i>271</i>
<i>Edad mayor que la de jubilación</i>	<i>186</i>
<i>Trabajo en solitario</i>	<i>178</i>
<i>Pista / Carretera</i>	<i>159</i>
<i>Pendientes</i>	<i>41</i>
<i>Socavones / obstáculos</i>	<i>30</i>

Tabla 1.- Factores de riesgo

Se puede comprobar que, además de la carencia de estructuras de protección al vuelco (ROPS), los factores de riesgo más importantes son la elevada edad de los tractoristas, por encima de la edad laboral, el trabajo en solitario que, aunque no aumenta el riesgo de vuelco, aumenta el riesgo de que el vuelco sea mortal porque impide una asistencia rápida, la circulación por pistas y carreteras, relacionada con el aumento de la velocidad y las pendientes, socavones y obstáculos.

Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Bernhardt et al. (1999) que estudiaron 342 accidentes mortales de tractor, ocurridos en un período de diez años (1979-1988) en el estado de Carolina del Norte en USA y comprobaron que el 38% de los fallecidos superaba la edad de 65 años. Estos autores señalaron como un importante factor de riesgo la falta de profesionalidad de los tractoristas pues sólo el 54% de los fallecidos, poco más de la mitad, eran trabajadores agrarios a tiempo completo o parcial, mientras que el 46% de los fallecidos no eran agricultores.

3.2.1. [Acciones para limitar el riesgo de vuelco](#)

Las investigaciones sobre los vuelcos de los tractores comenzaron al principio de los años 30 (Arndt, 1971) y se referían principalmente a su prevención.

Existen medidas preventivas del vuelco que están relacionadas con las buenas prácticas de conducción de los tractores como son utilizar una velocidad adecuada en cada caso, evitar las pendientes, sobre todo cuando existan irregularidades en el terreno, utilizar aperos adecuados al tractor, con tamaños relativos adecuados.

Se han señalado como medidas preventivas contra el vuelco el uso del trabajo en pendiente sólo con tractores especialmente estables; limitar el uso de tractores zancudos a terrenos llanos y utilizar los anchos de vía máximos posibles del tractor; la mejora de los caminos y los accesos a las parcelas, así como la eliminación de piedras y tocones que pueden aumentar la inclinación del tractor y el relleno de los socavones. La adecuada revisión y el mantenimiento de la dirección, embrague, amortiguadores y frenos de los tractores también reducen el riesgo de vuelco. Se han señalado algunas normas de seguridad para evitar el vuelco como conducir siempre el tractor a una distancia prudencial de las zonas del terreno que por presentar desniveles (zanjas, canales, regueras, taludes, cunetas, etc.) son propicias al vuelco; no apurar en exceso cuando se trabaje en labores próximas a lindes en desnivel; circular entre parcelas a distinto nivel siempre por accesos adecuados contruidos a tal fin, y nunca remontando o descendiendo el talud o pared de desnivel, por pequeño que sea éste; al iniciar el descenso por una pendiente, sobre todo si el tractor arrastra un remolque cargado, tener la precaución de poner la velocidad más corta a fin de evitar los cambios de velocidad en plena pendiente y frenadas bruscas con el riesgo de empuje posterior del remolque; llevar los pedales de freno bloqueados para que frenen las dos ruedas traseras a la vez; evitar la circulación con remolques excesivamente cargados o que no dispongan de sistemas de frenado independientes o que no frenen con intensidad proporcional a la que, en un momento dado, frena el tractor; evitar la subida de pendientes con aperos pesados suspendidos. En España se desarrolló la Nota Técnica de Prevención 259 por parte del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, para prevenir el vuelco en tractores, indicando una serie de medidas preventivas.

Otras prácticas recomendables son evitar el trabajo en solitario y, en caso de necesidad, comunicar el lugar de trabajo y comunicarse con alguien frecuentemente para evitar que, en caso de vuelco, se produzca una desatención prolongada, así como evitar el trabajo con tractores de personas de edad excesivamente avanzada.

También existen prácticas que reducen el riesgo de vuelco, principalmente el trasero, como es el lastrado de los tractores en los ejes o en la parte delantera. Asimismo se han estudiado sistemas de lastrado móvil controlados por inclinómetros que no han pasado de la fase de experimentación (Fabri y Ward, 2002).

En cualquier caso, se debería evitar, siempre que coincidan varios de estos factores de riesgo: edad avanzada, trabajo en solitario y condiciones inadecuadas.

En los años cincuenta se produjeron diferentes iniciativas para limitar el riesgo del vuelco como la conversión del eje motor del tractor en autonivelante, mediante un dispositivo hidráulico controlado por un péndulo amortiguado, que es un sistema similar al empleado en las cosechadoras autonivelantes, medida que resultó antieconómica.

También se utilizaron dispositivos ópticos o acústicos que avisaban al tractorista cuando el tractor se inclinaba por encima de un límite preestablecido; dispositivos de desembrague automático o parada de inyección de combustible mediante dispositivos eléctricos o mecánicos en la circunstancia de riesgo descrita; y colocación, a media altura y a ambos lados del tractor, de apoyos (patas). Estos apoyos tienen libertad de movimiento en el plano transversal del tractor con recorrido limitado hacia el cuerpo del mismo y libre hacia el exterior. Se activaban por la acción de la gravedad y, en caso de vuelco, el apoyo del lado sobre el que vuelca el tractor se mantiene perpendicular al suelo y se clava en el mismo, evitando el vuelco. Todos estos dispositivos no se han utilizado porque los sistemas de aviso se ajustaban para avisar en situaciones de peligro leve y los agricultores no atendían adecuadamente estas señales y los apoyos laterales no funcionan con el tractor en movimiento. Kise y Zhang (2006) desarrollaron un sensor que denominaron “sensor-in-the-loop” (SIL) que obtiene información sobre el movimiento y estabilidad del tractor en el terreno de manera que es capaz de predecir la forma en que el tractor se va a mover en los siguientes ocho metros. De esta forma, el SIL es capaz de predecir el vuelco con la suficiente antelación para mandar una señal al tractorista para que evite el vuelco. En este sistema se usa una cámara de estereovisión para crear una imagen tridimensional virtual del mapa del terreno sobre el que se mueve el tractor y esta imagen se compara con las obtenidas en una serie de ensayos de campo en los que se ha comprobado el movimiento del tractor y la capacidad del SIL para predecir dicho movimiento. En 2011 la empresa Desarrollo Tecnológico Agroindustrial desarrolló un dispositivo para prevenir el vuelco del tractor en maquinaria agrícola forestal, denominado INCLISAFE. Se trata de un dispositivo electrónico patentado que mide la inclinación y calcula la estabilidad de la maquinaria en la que se coloca, en función del terreno y del movimiento de dicha máquina. El INCLISAFE mide si la estabilidad de la máquina se acerca a una situación de peligro de vuelco, y si esto

ocurre, emite una señal sonora de gran potencia (hasta 90 dB), de frecuencia variable en función de la peligrosidad de la situación (Gamarra et al. 2012).

Marzo Quintanilla (2000) presentó una solicitud de patente de un brazo de seguridad antivuelco autoactivable para tractores. Este sistema está anclado a ambos lados del chasis y consiste en un brazo extensible, fijado mediante la compresión de unos muelles transversales y con unos muelles longitudinales. En caso de una excesiva inclinación, un dispositivo activa un motor que libera una uña de enclavamiento permitiendo la extensión de los muelles longitudinales que extienden el brazo antivuelco. Este sistema fue modificado por Marzo Quintanilla (2013) incluyendo un dispositivo pirotécnico que actúan cuando se produce un cierto grado de inclinación del vehículo

3.3. Las estructuras de protección al vuelco

Las buenas prácticas en la conducción de tractores nunca han sido suficientes para evitar el vuelco de los tractores, los sistemas de lastrado tampoco han sido muy eficaces y los sistema que intentan evitar los vuelcos tampoco han tenido éxito y ni siquiera se han comercializado.

En los años 50, el profesor Moberg, director del Instituto Nacional Sueco para el ensayo de máquinas agrícolas (NTIAM), puso de manifiesto que, aunque los accidentes de automóvil se producen en condición es más desfavorables que los del tractor, las consecuencias de estos últimos son las más graves, debido a que los automóviles disponen de techo y los tractores carecen de él. Concretamente señaló que, en Suecia, se producía solo una muerte por cada 9.000 a 10.000 automóviles (Moberg, 1954). Esta consideración llevó a la adopción de las estructuras de protección al vuelco (ROPS) como método principal de aumento de la seguridad de los tractores. El Profesor Moberg demostró que la seguridad pasiva tenía una clara ventaja sobre la seguridad activa, en el caso del vuelco del tractor, y con su idea revolucionó el diseño de los tractores, que en los años cincuenta carecían de cabina y los tractoristas sufrían las inclemencias del tiempo y, a partir de la toma de conciencia del aumento de la seguridad proporcionada por las cabinas, los tractores fueron diseñados con cabinas que cumplían la doble

función de protección de la intemperie y de las consecuencias de un vuelco. A consecuencia de este trabajo (Moberg, 1973), en 1966, se discutió el primer código de ensayo de estructuras de protección al vuelco en la OCDE que fue aprobado en 1967 (OECD Code 3, 1967).

La forma más efectiva en la prevención de riesgos por vuelco del tractor no ha sido la eliminación del vuelco sino la reducción de sus consecuencias.

Dentro de los dispositivos que minimizan las consecuencias de los vuelcos de los tractores, las más importantes son las estructuras de protección al vuelco ROPS, que es el acrónimo inglés de “*Roll-Over Protective Structure*”. Las ROPS son armazones resistentes montados sobre los tractores o formando parte de su cabina que limitan las consecuencias del vuelco del tractor y protegen, durante el mismo, la integridad del tractorista. Consisten en estructuras fijas, parcialmente desplazables o reclinables que rodean la zona de seguridad alrededor del asiento que debe ocupar el tractorista, durante un vuelco, para proporcionarle la suficiente seguridad tanto en vuelcos traseros como laterales (Febo y Pessina, 1989; Ayers et al., 1994). Las ROPS suelen construirse con perfiles metálicos de sección cuadrada o circular.

Las ROPS son estructuras de acero u otro material resistente que aseguran que durante el vuelco del tractor se conserva un volumen en su interior, llamado zona de seguridad, lo suficientemente grande para que el tractorista esté a salvo si permanece en él, sentado en su asiento, apoyado sobre el volante y firmemente agarrado al mismo. Las ROPS deben deformarse lo suficiente para absorber la parte de la energía del vuelco que no es absorbida por el suelo y el propio tractor, pero no tanto que la estructura invada la zona de seguridad en la que debe permanecer el tractorista. Los códigos de la OCDE las definen como las estructuras que se montan en los tractores con el objetivo fundamental de evitar o limitar los riesgos que se derivan para el tractorista de un vuelco del tractor en durante su uso en condiciones normales (OECD, 2011)

La mayoría de los accidentes mortales se producen con tractores sin estructura de protección (Mangado et al., 2007a) y el uso de estas estructuras puede reducir en un 99% el riesgo de muerte asociado al vuelco de los tractores

(Hallman, 2005). En el estudio realizado por Arana et al. (2010) se pudo comprobar que sólo una de las 272 muertes producidas por el vuelco de los tractores sucedió en un tractor que disponía de una ROPS homologada. Una ROPS homologada y un cinturón de seguridad pueden prevenir casi todos los accidentes fatales (MMWR, 1993; Powers et al., 2001).

El montaje de estructuras de protección al vuelco en los tractores es una de las causas más importantes en el descenso de los accidentes mortales en agricultura que se ha registrado en todos los países desarrollados en los últimos cincuenta años. En Italia se ha pasado de un promedio de 1.150 a 1.200 accidentes mortales anuales a unos 130-140 muertes por año (Gasparetto, 2002). En Alemania ocurrían, en 1954, 200 muertes por año, lo que suponía 40 muertes por cada 100.000 tractores; en 1963 este índice bajó hasta 20 muertos por cada 100.000 tractores, a pesar de que todavía no se usaban las ROPS, debido a una adecuada formación de los tractoristas y en 1970 se redujo a 10 muertos por cada 100.000 tractores, debido al aumento de la potencia de los tractores y a un solo muerto por cada 100.000 tractores cuando se generalizó el uso de las ROPS (Márquez, 2012). En Francia en los años 1971 y 1972 se realizó una encuesta que puso de manifiesto que con la simple utilización de cabinas de intemperie, sin los necesarios requisitos para proporcionar suficiente seguridad, la relación entre los números de vuelcos totales y fatales descendió de 6/12 a 1/12. En Suecia, el Gobierno comenzó a exigir ROPS para todos los tractores nuevos en 1959 y en 1990 el 93% de los tractores tenían ROPS o cabinas de seguridad (Springfeldt et al., 1998), pasando de 15 accidentes mortales en 1957 hasta sólo uno en 1990 (Thelin, 1998). En este país el índice de mortalidad llegó a menos de un muerto por cada 100.000 trabajadores, 24 veces menor que el registrado en USA, donde, en 1993, más del 62% de los tractores carecían de estructura de protección al vuelco (Myers y Snyder, 1995). En España, el Real Decreto 1215/1997 del 18 de julio, obliga a todos los tractores, viejos o nuevos, que sean considerados equipos de trabajo y para ser utilizados con trabajadores por cuenta ajena, a tener un dispositivo de protección.

3.3.1. Tipos de ROPS

Existen tres tipos de ROPS: arcos de seguridad, bastidores de seguridad y cabinas de seguridad (figuras 1, 2 y 3).

Los arcos de seguridad están compuestos por dos elementos lineales verticales montantes, unidos por una traviesa en su extremo superior y fijado al tractor en dos puntos que se encuentran en el eje trasero o en la parte delantera del tractor, en algunos casos, llevan un toldo en ménsula unido al travesaño superior.



Figura1.- Tractor con arco de seguridad

Los bastidores de seguridad: están constituidos por cuatro elementos montantes, en algunos casos se suelen poner seis u ocho, unidos en su extremo superior con barras horizontales, definiendo un polígono y pudiendo existir otros componentes estructurales para dar rigidez al conjunto. Se suelen montar en el tractor apoyándolos, al menos, en cuatro puntos, tantos como barras montantes existan, que suelen estar localizados en los

semiejes traseros, comúnmente denominados semiejes. Los guardabarros estarán suficientemente reforzados y unidos rígidamente a las semiejes y al chasis que soporte el motor o al mismo bloque de éste.



Figura 2.- Tractor con bastidor de seguridad

Las cabinas de seguridad: pueden ser construidas pertrechando adecuadamente un bastidor de seguridad mediante accesorios que aíslan al conductor del tractor del medio exterior. Estos accesorios serán, al menos, techos, parabrisas, paneles laterales y puertas de acceso. Siendo el elemento de protección en caso de vuelco el bastidor de seguridad, los accesorios cumplen la función de preservar al conductor de los agentes atmosféricos sin ser elementos estructurales resistentes. La cabina, además de proteger al conductor de ser aplastado en caso de vuelco, le preserva de las inclemencias meteorológicas, pudiendo estar en algunos casos climatizadas. Si las cabinas no son de seguridad, no evitan el aplastamiento del conductor en caso de vuelco, y constituyen un impedimento para el posible escape del conductor.



Figura 3.- Tractor con cabina de seguridad

Los arcos de seguridad son las ROPS más comúnmente montadas en los tractores estrechos y en los tractores pequeños. Estos arcos son delanteros o traseros según se monten por delante o por detrás del asiento. En muchas ocasiones, son abatibles para permitir que los tractores puedan trabajar en plantaciones frutales, forestales o en invernaderos sin que el arco de seguridad dificulte su paso bajo los árboles o las estructuras.

3.3.2. Las normas y códigos de ensayo de las ROPS montadas en los tractores

En los años cincuenta se comenzó a estudiar el grado de protección que las distintas ROPS proporcionaban a los tractores. En 1951 se usaron los primeros toldos de protección de tractores de cadenas y excavadoras y, casi al mismo tiempo, se comenzó a trabajar en una secuencia de ensayos sobre las estructuras de protección para los tractores (Ross and DiMartino, 1982). Los primeros ensayos eran destructivos y consistían en el vuelco real del tractor equipado con una estructura de protección, como puede verse en la figura 4. Se colocaba un tractor en una pendiente muy inclinada provocando su vuelco. Se podía comprobar si el tractor daba un giro inferior a 180° o rodaba y al final del vuelco, se podía comprobar la deformación sufrida por la estructura de protección al vuelco y evaluar las posibilidades de supervivencia que hubiera tenido el tractorista que hubiera estado en el tractor volcado.

Este tipo de ensayo no pudo ser considerado satisfactorio porque el tractor sufría, al menos, una destrucción parcial lo que hacía el ensayo muy costoso y no se podía asegurar la suficiente reproducibilidad del ensayo. Además existía una gran variabilidad de unos a otros debido a que se dan una gran variabilidad en las tensiones que se producían de un vuelco a otro.

Estos trabajos dieron lugar al primer ensayo de una ROPS, que se realizó en el Instituto Nacional Sueco para el ensayo de máquinas agrícolas en Uppsala en 1954 (Gasparetto, 1968). Era una secuencia de ensayos que incluía impactos de una masa con movimiento pendular sobre la ROPS.



Figura 4.- Ensayo de una estructura de protección por vuelco real (Uppsala. Suecia. 1956)

Los Cuerpos de Ingenieros de la División del Pacífico Norte de la Armada de los Estados Unidos desarrollaron las primeras normas sobre ROPS estableciendo, en 1958, los requerimientos para los toldos de protección usados en la construcción pesada realizada en la División. El principio fundamental de esta norma era que el toldo debía resistir cargas longitudinales y verticales equivalentes al doble de su peso (MacCollum, 1984).

Suecia mostró el camino para el desarrollo de muchas de las normas de ensayo de ROPS. Moberg (1973) y sus colaboradores concluyeron que la mejor opción era fijar el tractor al suelo del laboratorio y someterlo a fuerzas de aplastamiento. Estas fuerzas

podían ser dinámicas o estáticas, las estáticas se podían realizar usando de una instalación hidráulica y las dinámicas usando un péndulo. Comprobaron que la aplicación estática de una determinada cantidad de energía tiene como consecuencia una mayor tasa de deformación, si la comparamos con la aplicación dinámica. También vieron que el incremento de la velocidad del impacto reduce la tasa de deformación. Concluyeron que el ensayo dinámico, por medio de un péndulo, era el mejor test. La energía potencial del péndulo se determinó para que fuera equivalente a la medida en los ensayos de vuelco real. Este trabajo fue la base sobre la que se desarrolló el código de ensayo de la OCDE, en 1959. Inicialmente se especificaron tres impactos del péndulo: trasero, lateral y delantero. La energía de los impactos dependía de la masa del tractor en una relación casi lineal. Se determinó con estos ensayos una zona de seguridad, que en la actualidad es muy similar a las utilizadas por la norma SAEJ2194 y por el Código 4. Moberg también evaluó la cantidad de energía que era absorbida por la ROPS y por las ruedas y los anclajes del tractor, y comprobó que entre el 75 y el 85% de la energía fue absorbida por las ROPS de resistencia normal.

En 1966, el Reino Unido publicó la norma de ensayo BS 4063 aunque el ensayo no era obligatorio. En los años sesenta se asignó a comités compuestos por miembros de la Sociedad Americana de Automoción (SAE) y de la Sociedad Americana de Ingenieros Agrónomos (ASAE) la tarea de desarrollar normas para las ROPS. En 1968 la SAE publicó la norma SAE J334 que fue modificada en 1970 por la norma SAE J334a que incluía los ensayos estáticos. Esta norma fue la base para las normas OSHAS (Harris, 2008) y muchos de sus conceptos fueron incluidos en la norma SAE J1194, concretamente los requerimientos de energía en las cargas longitudinales, aunque la zona de seguridad contemplada por esta norma era diferente. La ASAE desarrolló las normas S305 y la S306. En 1970, varios países europeos adoptaron el Código 3.

En los años setenta se realizaron importantes estudios para evaluar la forma en que las ROPS protegían al tractorista durante los vuelcos. Chisholm (1972) construyó una plataforma desde la que hacía volcar un tractor equipado con una ROPS que incluía sensores de carga para estudiar los vuelcos de los tractores y sus consecuencias sobre sus estructuras de protección. Hizo un estudio sobre 114 casos de vuelco lateral y, a partir de los resultados obtenidos, desarrolló una simulación informática del vuelco de los tractores y un modelo matemático del vuelco y de las deformaciones que se

producen en las ROPS (Chisholm, 1979a). Este modelo fue validado posteriormente por este mismo autor (Chisholm, 1979b) y sirvió para evaluar los efectos de la variación de los parámetros más determinantes del vuelco de los tractores y del comportamiento de las ROPS, durante los impactos producidos en los vuelcos (Chisholm, 1979c). En 1973 Schwanghart calculó las deformaciones que se producían en las ROPS durante los ensayos de homologación.

A partir de estas deformaciones se podía ver el volumen seguro que quedaría después del ensayo y si el resultado del ensayo era positivo o negativo. Schwanghart (1978) comparó la energía aplicada y absorbida por las estructuras de protección con las desarrolladas en los vuelcos reales. En esta década se propuso un ensayo estático de los tractores equipados con ROPS para simular su vuelco, en la que las estructuras eran empujadas por cilindros hidráulicos de desplazamiento lento.

En lo que estos investigadores estaban de acuerdo es que existía una proporción entre la energía desarrollada durante el vuelco del tractor, y la energía que debía ser absorbida por la ROPS. La energía desarrollada durante el vuelco puede ser energía cinética debida a la velocidad del tractor, o energía potencial debida a la posición de su centro de gravedad, por lo que la energía que es absorbida por la ROPS es una parte de la energía total disipada en el vuelco y es proporcional a la masa del tractor.

A partir de estas investigaciones se desarrollaron las distintas normas y código de ensayos de los tractores equipados con ROPS. Las normas más importantes son los códigos de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), las normas de la Sociedad de Ingenieros de la Automoción (SAE) y los códigos orientativos de la Sociedad Americana de Ingenieros Agrónomos (ASAE).

Todos estos códigos son unas normas que definen y normalizan unos ensayos que simulan las acciones que las ROPS sufren durante los vuelcos que se pueden considerar normales o habituales. Estos vuelcos pueden ser traseros o delanteros, según la posición del centro de gravedad del tractor (cuando este punto está por detrás del centro del tractor se simula el vuelco trasero y, en caso contrario, se simula el delantero) así como lateral. En todos los ensayos se simula también los efectos de unos aplastamientos del tractor que se pueden producir si el tractor llega a estar apoyado sólo en su ROPS.

3.3.2.1. Los códigos de la OCDE

Son los códigos de ensayo de tractores con ROPS más utilizados en la actualidad, los cuales se usan en todos los países de la OCDE. La primera directiva europea que trató la homologación de tractores fue la Directiva 74/150/CEE de 1974.

En los primeros años de aplicación de los códigos se usó mucho el Código 3 que es una secuencia de ensayos dinámicos en los que las acciones que sufren las ROPS se simulan mediante un golpe de una gran masa suspendida de una cadena y con movimiento pendular golpea la ROPS en unos puntos perfectamente definidos. La secuencia de ensayos de este código es un golpe en la parte trasera de la ROPS, que simula el recibido por la parte superior trasera de la ROPS en caso de vuelco trasero; un primer aplastamiento, un golpe en el lateral de la ROPS, que simula el sufrido en un vuelco lateral y un segundo aplastamiento. Este código de ensayo está definido en la Directiva 77/536/CEE.

Este ensayo es muy complicado de realizar y resulta incluso algo peligroso por lo que, actualmente, se ha impuesto la realización de ensayos estáticos, en los que los esfuerzos recibidos por las ROPS parten de un valor pequeño y se van incrementando lentamente. Estos esfuerzos se realizan mediante cilindros hidráulicos y unos sensores miden, de forma continua, los esfuerzos realizados y las deformaciones producidas de manera que se puede obtener la energía absorbida por la ROPS. Los principales códigos de ensayo estático son el Código 4, el Código 6 y el Código 7.

3.3.2.1.1. El Código 3

El Código 3 se puede aplicar a los tractores que tienen, al menos, dos ejes con ruedas o de cadenas cuya masa en vacío sea igual o superior a 600 kg y normalmente inferior a 6.000 kg. La anchura mínima del eje trasero generalmente deberá ser mayor de 1.150 mm y se señala que existen una serie de tractores como zancudos, viñeros estrechos etc., para los que esta directiva no es aplicable.

La ROPS es golpeada por un bloque con movimiento pendular y sometida a dos ensayos de aplastamiento, delantero y trasero. La masa del bloque que impacta la ROPS es de 2.000 kg y las dimensiones de la cara que impacta el tractor son 680 x 680 mm. Esta masa de 2.000 kg era la masa media utilizada por Moberg en sus ensayos (Gasparetto et al., 1987)

En el impacto trasero, el bloque se eleva a una altura sobre el punto de impacto definida por la fórmula:

$$H = 2,165 * 10^{-8} ML^2 \text{ (mm) } \text{ ó }$$

$$H = 5,73 * 10^{-2} I \text{ (mm)}$$

siendo H (mm) la altura sobre el punto de impacto desde la que se deja caer el centro de masas de la masa impactante, M (kg) la masa de referencia del tractor, L (m) la batalla del tractor e I (kg.m²) el momento de inercia del tractor respecto al eje trasero.

En el impacto lateral, el bloque se eleva a una altura sobre el punto de impacto definida por la fórmula:

$$H = 125 + 0,15M \text{ (mm)}$$

En el impacto delantero la masa se deja caer desde una altura definida por la fórmula:

$$H = 125 + 0,02M \text{ (mm)}$$

Las condiciones de aceptabilidad del ensayo son que tras su finalización, no puede haber roturas en elementos estructurales, componentes de montaje, soldaduras o partes del tractor que contribuyan a la resistencia de la ROPS; la ROPS deberá resistir la fuerza ejercida durante los ensayos de aplastamiento; la diferencia entre las deformaciones máxima y permanente no alcanzará los 250 mm; ninguna parte de la estructura podrá invadir la zona de seguridad ni golpear el asiento durante ningún momento de los ensayos. Además, la zona de seguridad nunca quedar desprotegida por la ROPS, considerándola desprotegida si cualquier parte de ella podría entrar en

contacto con el suelo si el tractor vuelca en la dirección en que actúa la carga. Para estimar esto, los neumáticos y el ancho de vía serán los menores posibles del equipamiento estándar especificado por el fabricante.

En la figura 5 aparece un ensayo dinámico realizado de acuerdo al Código 3



Figura 5.- Ensayo dinámico

3.3.2.1.2. El Código 4

La Directiva 79/622/CEE, de 25 de junio de 1979 define el código de ensayos de tractores equipados con ROPS denominado Código 4. Esta directiva es de aplicación a todos los tractores de al menos dos ejes con ruedas o de cadenas cuya masa en vacío sea igual o superior a 600 kg y que cumplan que la “mass ratio” definida como el cociente entre la masa máxima admisible fijada para el tractor y la masa de referencia utilizada en el ensayo no supere el valor 1,75. La anchura mínima del eje trasero generalmente deberá ser mayor de 1.150 mm y se señala que existen una serie de tractores como zancudos, viñeros estrechos etc., para los que esta directiva no es aplicable.

En este código de ensayo se especifica perfectamente la secuencia de ensayos que se debe realizar, el orden de los ensayos, la forma en que se debe realizar cada uno de los ensayos incluidos en la secuencia, los puntos de aplicación de los esfuerzos y el momento de la detención de los ensayos.

La secuencia de ensayos incluye, en primer lugar, un ensayo de carga longitudinal trasera, en segundo lugar, un aplastamiento realizado en la parte frontal de la ROPS, en tercer lugar un ensayo de carga lateral, realizado en el extremo opuesto al que se realizó el ensayo de carga longitudinal trasera y por último, un aplastamiento trasero.

El momento fijado por el código para la detención de cada uno de estos ensayos es, para el ensayo de longitudinal trasera, el momento en que la energía total absorbida por la ROPS alcanza el valor expresado por la fórmula:

$$E_{IL1} = 1,4M \text{ (J)}$$

para la detención de los ensayos de aplastamiento, cuando transcurren 5 segundos después de la aplicación continua de una fuerza equivalente a:

$$F = 20 M \text{ (N)}$$

y el ensayo de carga lateral se detiene cuando la ROPS absorbe una energía determinada por la fórmula:

$$E_{IS} = 1,75M \text{ (J)}$$

Siendo E_{IL1} y E_{IS} las energías absorbidas en los ensayos de carga trasera y lateral, F la fuerza vertical ejercida en los ensayos de aplastamiento y M la masa de referencia utilizada en los ensayos, que habitualmente es su valor mínimo admisible que es la masa en vacío de los tractores ensayados.

Las condiciones de aceptabilidad del ensayo son que ninguna parte de la estructura podrá invadir la zona de seguridad ni golpear el asiento durante ningún momento de los ensayos. Además, la zona de seguridad nunca quedará desprotegida por la ROPS, considerándola desprotegida si cualquier parte de ella podría entrar en contacto con el suelo si el tractor vuelca en la dirección en que actúa la carga. Para estimar esto, los neumáticos y el ancho de vía serán los menores posibles del equipamiento estándar especificado por el fabricante.

En los ensayos de carga horizontal, en el momento en que la energía absorbida por la ROPS alcance el valor requerido, la fuerza tendrá un valor de al menos el 80% de la fuerza máxima registrada durante ese ensayo. Se realizará una sobrecarga cuando la fuerza se reduzca más del 3% en el tramo correspondiente al último 5% de deformación antes de la absorción de la energía requerida. La ROPS deberá resistir la fuerza ejercida durante los ensayos de aplastamiento. No podrá haber ninguna parte o componente sobresaliente que pudiera causar heridas graves durante el vuelco o que, en su deformación, pudiera atrapar al tractorista, ni que representen un grave peligro para el mismo.

3.3.2.1.3. El Código 6

La Directiva 87/402/CEE define el Código 6, que es el normalizado para ensayos oficiales de estructuras de protección al vuelco montadas en la parte delantera de los tractores estrechos agrícolas y forestales.

La Directiva 87/402/CEE es de aplicación a todos los tractores de ruedas que tienen un despeje de no más de 600 mm en ambos ejes, con ancho de vía menor de 1.150 mm, una masa en vacío comprendida entre los 400 y los 3.500 kilogramos, que cumplan que la “mass ratio” definida como el cociente entre la masa máxima admisible fijada para el tractor y la masa de referencia utilizada en el ensayo no supere el valor 1,75 y que están equipados con una estructura de protección al vuelco del tipo arco delantero de dos pilares anclados en la parte delantera del tractor.

Algunos autores como Molari y Rondelli (2004) recomiendan que esta denominación de tractor estrecho, al que debe aplicarse la citada directiva europea debería aplicarse a aquellos tractores agrícolas que, cuando montan los neumáticos de mayor diámetro indicados por el fabricante, tienen una mínima anchura de vía de no más de 1.150 mm.

El ensayo de homologación incluye dos ensayos previos, uno de estabilidad lateral y otro que asegura la imposibilidad de rodadura continua en caso de vuelco, denominado “de rodadura no continua” y una secuencia de ensayos similar a la definida en el Código 4.

En el ensayo de estabilidad lateral, el tractor, inclinado hasta formar un ángulo con la horizontal, debe permanecer en equilibrio estable sin volcar hasta que se alcance un ángulo de al menos 38°.

En el de rodadura continua se admite el ensayo de vuelco real sobre una pendiente inclinada de 1/1,5 sin que se produzca giro mayor de 180°. El proceso de vuelco de un tractor equipado con arco delantero es diferente al del tractor que dispone de arco trasero, como se ve en la figura 6. Utilizando los ejes de rotación marcados en la figura se puede calcular matemáticamente si después del vuelco se produce rodadura. Esto puede realizarse fácilmente utilizando un programa informático desarrollado por Arana et al. (2008).

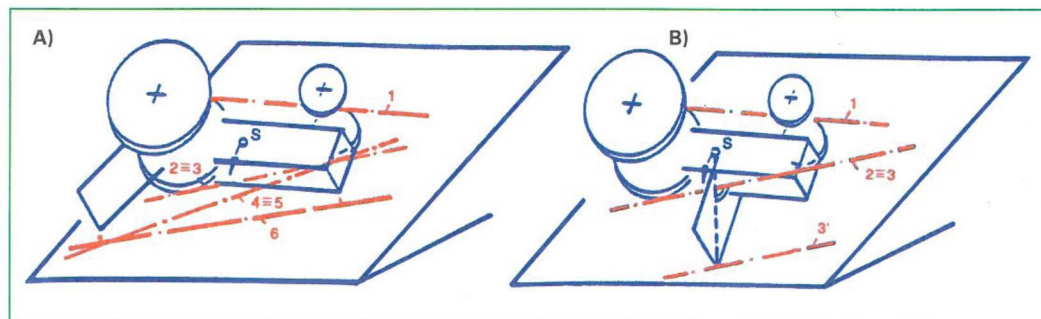


Figura 6.- Ejes de rotación el vuelco de un tractor. A) Eje trasero; B) Eje delantero (Márquez, 2012)

En este código de ensayo, como en todas las normas de ensayo, se define perfectamente la zona de seguridad, la cual debe ser protegida durante todo el vuelco por la ROPS. Esta zona de seguridad es el volumen donde debe mantenerse el tractorista durante todo el vuelco para que la seguridad que aporta la estructura de protección sea suficiente. Coincide con el volumen que una persona grande, aunque normal, puede ocupar durante el vuelco, si se mantiene sentada en su asiento, firmemente agarrada al volante y recostando su cabeza sobre él.

La zona de seguridad definida en el Código 6, la cual se muestra en las figuras 7 y 7 (bis), es similar a la definida en el Código 4, pero en este caso es importante destacar que debe tenerse muy en cuenta el criterio de exposición, porque los arcos de seguridad no engloban totalmente la zona de seguridad y está debe ser rodeada por la ROPS, el punto o puntos duros del tractor, así como el propio plano del suelo.

Tanto la zona de seguridad está referida al punto indicado del asiento, y ambos están definidos en el Código 6. Este punto se define como el punto del plano medio del asiento donde interseccionan el plano tangencial a la parte inferior del respaldo y un plano horizontal que corta a la superficie de la base del asiento a 150 mm del citado plano tangencial al respaldo.

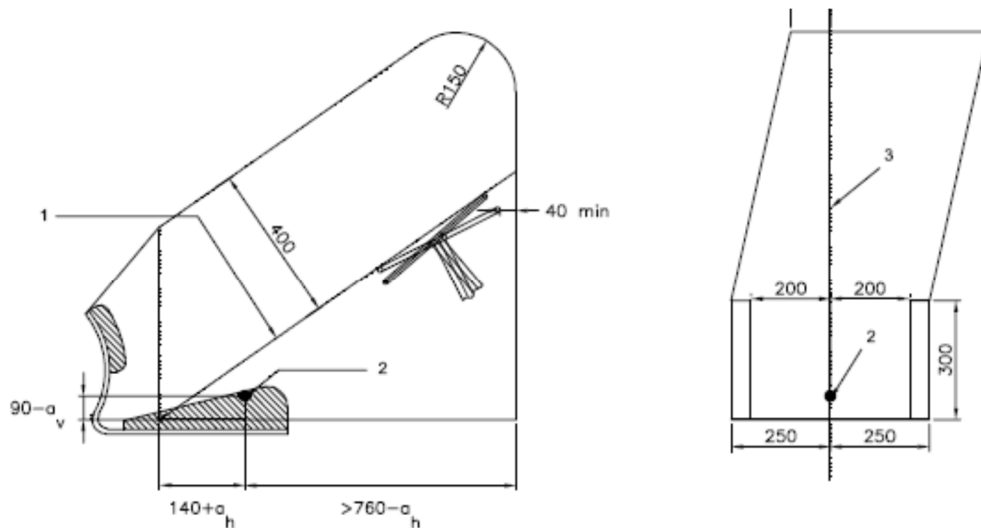


Figura 7.- Zona de seguridad, definida por el Código 6 [1. Línea de referencia; 2. Punto indicativo del asiento (SIP); 3. Plano de referencia]

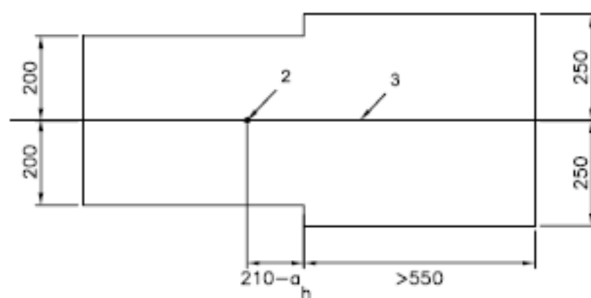


Figura 7 (bis).- Zona de seguridad, definida por el Código 6 [1. Línea de referencia; 2. Punto indicativo del asiento (SIP)]

En la figura 8 se muestra el plano del suelo, apoyado en el arco de protección delantero y en un arco trasero. En algunos tractores no es necesario incorporar el pequeño arco trasero y el plano del suelo se apoya en el arco delantero y las propias ruedas del tractor. Sin embargo, se comercializan muchos tractores sin arco trasero o con un arco trasero tan bajo que no protegen adecuadamente la zona de supervivencia aun sin deformación.

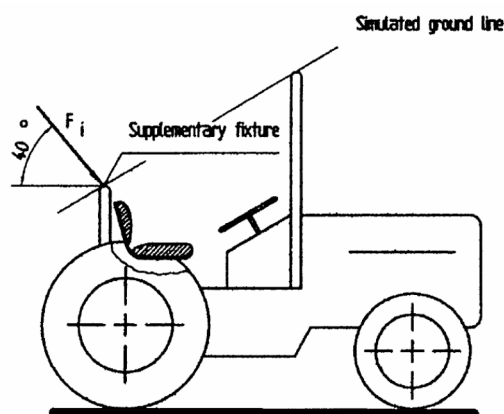


Figura 8.- Simulación del plano del suelo según el Código 6

Las condiciones de aceptabilidad del ensayo son que, después de cada ensayo, no puede haber roturas o fisuras en elementos estructurales, componentes de montaje, soldaduras o partes del tractor que contribuyan a la resistencia de la ROPS; la ROPS deberá resistir la fuerza ejercida durante los ensayos de aplastamiento; la diferencia entre las deformaciones máxima y permanente no alcanzará los 250 mm.; ninguna parte de la estructura podrá invadir la zona de seguridad ni golpear el asiento durante ningún momento de los ensayos.

Además, la zona de seguridad nunca quedará desprotegida por la ROPS, considerándola desprotegida si cualquier parte de ella podría entrar en contacto con el suelo si el tractor vuelca en la dirección en que actúa la carga. Para estimar esto, los neumáticos y el ancho de vía serán los menores posibles del equipamiento estándar especificado por el fabricante. Durante el ensayo, la estructura no impondrá restricciones a la estructura del asiento. No podrán existir accesorios que representen un peligro para el conductor ni partes de la estructura o accesorios que pudieran ser proyectados hiriendo al conductor, durante el vuelco, ni accesorios que puedan atraparlo

3.3.2.1.4. El Código 7

La Directiva 86/298/CEE correspondiente al código normalizado para ensayos oficiales de estructuras de protección al vuelco montadas en la parte trasera de los tractores estrechos agrícolas y forestales (Código 7).

La Directiva 86/298/CEE es de aplicación a todos los tractores de ruedas que tienen un despeje de no más de 600 mm en ambos ejes, con ancho de vía menor de 1.150 mm, una masa en vacío comprendida entre los 400 y los 3.500 kilogramos, que cumplan que la “mass ratio” definida como el cociente entre la masa máxima admisible fijada para el tractor y la masa de referencia utilizada en el ensayo no supere el valor 1,75 y que están equipados con una estructura de protección al vuelco del tipo arco trasero de dos pilares anclados en la parte trasera del tractor o un armazón o cabina que proporcione una zona de seguridad con un límite superior de al menos 810 mm por encima del punto indicativo del asiento.

El ensayo de homologación incluye un ensayo de carga longitudinal trasero, un ensayo de aplastamiento trasero, un ensayo de carga longitudinal delantero, un ensayo de carga lateral y un segundo aplastamiento delantero.

En la figura 9 se puede ver la zona de seguridad tal y como está definida en el Código 7.

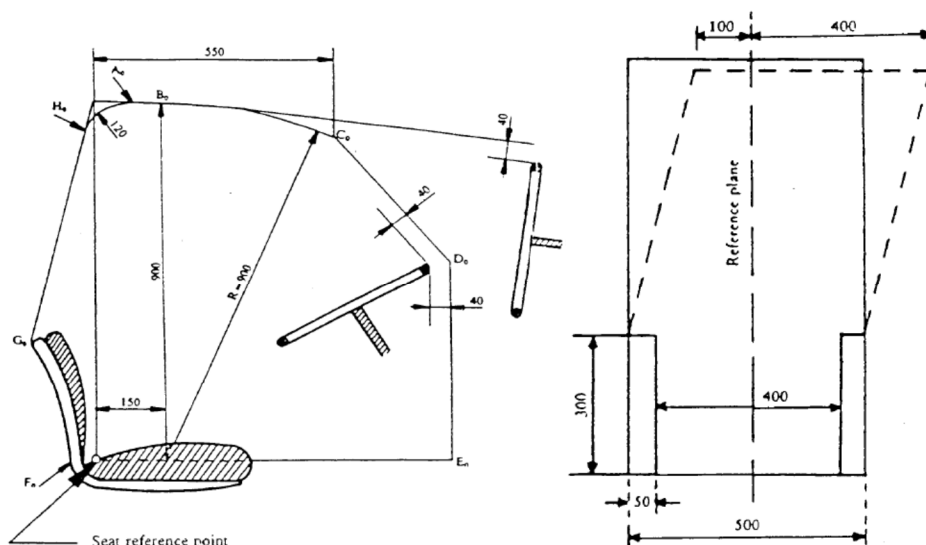


Figura 9.- Zona de seguridad definida en el Código 7

Las condiciones de aceptabilidad del ensayo son que, después de cada ensayo en el procedimiento dinámico, no puede haber roturas o fisuras en elementos estructurales, componentes de montaje, soldaduras o partes del tractor que contribuyan a la resistencia de la ROPS. Si aparecieran, sería necesario realizar una sobrecarga. En el ensayo estático, en el momento en que la energía absorbida por la ROPS alcance el valor requerido en el ensayo normal o en el de sobrecarga, la fuerza tendrá un valor de al menos el 80% de la fuerza máxima registrada durante ese ensayo. Si en el ensayo estático aparecen roturas o fisuras durante el ensayo de aplastamiento, se realizará un ensayo de sobrecarga inmediatamente después de este ensayo. La diferencia entre las deformaciones máxima y permanente no alcanzará los 250 mm. Ninguna parte de la estructura podrá invadir la zona de seguridad ni golpear el asiento, durante ningún momento de los ensayos. Además, la zona de seguridad nunca quedar desprotegida por la ROPS, considerándola desprotegida si cualquier parte de ella podría entrar en contacto con el suelo si el tractor vuelca en la dirección en que actúa la carga. Para estimar esto, los neumáticos y el ancho de vía serán los menores posibles del equipamiento estándar especificado por el fabricante. Durante el ensayo, la estructura no impondrá restricciones a la estructura del asiento. No podrán existir accesorios que representen un peligro para el conductor ni partes de la estructura o accesorios que pudieran ser proyectados hiriendo al conductor, durante el vuelco, ni accesorios que puedan atraparlo.

3.3.2.1.5. El Código 8

La Directiva 79/622/CEE es la correspondiente al código normalizado para ensayos oficiales de estructuras de protección al vuelco montadas en los tractores de orugas (Código 8).

La Directiva 79/622/CEE es de aplicación a todos los tractores de al menos dos ejes con acoplamientos para orugas con masas en vacío de al menos 600 kg y un despeje de no más de 600 mm, en los ejes delantero y trasero.

El ensayo de homologación incluye un ensayo de carga lateral, un ensayo de aplastamiento y un ensayo de carga longitudinal. La zona de seguridad es diferente a la definida en el resto de los códigos.

3.3.2.2. Las directivas CEE

Existen diferentes directivas de la UE que regulan la forma en que deben ser ensayadas las ROPS montadas en los tractores agrícolas y forestales, según se trate de tractores normales o estrechos y, en este caso, según la posición del arco de seguridad respecto al punto indicativo del asiento.

3.3.2.2.1. La Directiva 77/536/CEE

Esta directiva regula la forma en que se deben realizar los ensayos dinámicos realizados sobre tractores normales.

Las fórmulas empleadas en esta metodología para la elección de la altura desde la que se deja caer el péndulo son:

- Para el ensayo trasero:

$$H = 0,02M + 125(\text{mm})$$

$$M = [1.500:3.500] \text{ kg}$$

$$H = 2,165 * 10^{-2}ML^2(\text{mm}) \text{ ó}$$

$$M = [1.500:4.500] \text{ kg}$$

$$H = 5,73 * 10^{-2}I (\text{mm})$$

- Para el ensayo delantero

$$H = 0,02M + 125(\text{mm})$$

- Para el ensayo lateral:

$$H = 0,15M + 125 \text{ (mm)}$$

En el año 1987, esta directiva fue modificada por la Directiva 87/354/CEE de 15 de junio de 1987, eliminándose las fórmulas citadas en segundo y tercer lugar, para el ensayo trasero y definiendo la altura desde la que se debe dejar caer el péndulo, en el ensayo trasero mediante la primera fórmula:

$$H = 0,02M + 125 \text{ (mm)}$$

$$M = [1.500;4.500] \text{ kg}$$

En 1989, la Directiva 89/680/CEE de 21 de diciembre de 1989, amplió el ámbito de aplicación de la norma a los tractores de hasta 6000 kg, lo que sigue vigente tras la última modificación de la norma realizada por la Directiva 2006/96/CE, de 20 de noviembre de 2006.

3.3.2.2.2. La Directiva 77/622 CEE

Esta directiva regula la forma en que se deben realizar los ensayos estáticos realizados sobre tractores normales.

Las fórmulas empleadas en esta metodología para la elección de la energía que debe absorber la ROPS antes de la detención del ensayo son idénticas a las del Código 4.

3.3.2.2.3. La Directiva 86/298 CEE

Esta directiva regula la forma en que se deben realizar los ensayos dinámicos y estáticos para arcos traseros montados en tractores estrechos.

Respecto a los ensayos dinámicos, las fórmulas empleadas para determinar la altura de caída del péndulo dependen para cada ensayo:

- Para el ensayo trasero:

$$H = 2,165 * 10^{-2} ML^2 \text{ (mm) } \text{ ó }$$

$$H = 5,73 * 10^{-2} I \text{ (mm)}$$

- Para el ensayo delantero:

$$H = 0,07 M + 25 \text{ (mm)}$$

$$M < 2000 \text{ kg}$$

$$H = 0,02 M + 25 \text{ (mm)}$$

$$M \geq 2000 \text{ kg}$$

- Para el ensayo lateral:

$$H = 0,02M + 25 \text{ (mm)}$$

$$M < 2000 \text{ kg}$$

$$H = 0,15 M + 25 \text{ (mm)}$$

$$M \geq 2000 \text{ kg}$$

Respecto a los ensayos estáticos, las fórmulas empleadas para la elección de la energía que debe absorber la ROPS antes de la detención del ensayo son:

- Para el ensayo trasero:

$$E_{IL1} = 0,5M + 500 \text{ (J)}$$

- Para el ensayo delantero:

$$E_{IS} = 1,75M \text{ (J)}$$

3.3.2.2.4. La Directiva 87/402/CEE

Esta directiva regula la forma en que se deben realizar los ensayos dinámicos y estáticos para arcos delanteros montados en tractores estrechos.

Para ensayos dinámicos, las fórmulas empleadas para determinar la altura de caída del péndulo dependen para cada ensayo:

- Para los ensayos trasero y delantero:

$$H = 0,07 M + 25 \text{ (mm)} \quad M < 2000 \text{ kg}$$

$$H = 0,02 M + 125 \text{ (mm)} \quad M \geq 2000 \text{ kg}$$

- Para los ensayos trasero y delantero:

$$H = (0,20M + 25) [(B_b + B)/2B] \text{ (mm)} \quad M < 2000 \text{ kg}$$

$$H = (0,15M + 125) [(B_b + B)/2B] \text{ (mm)} \quad M \geq 2000 \text{ kg}$$

donde B es la anchura mínima del tractor y B_b es la anchura máxima exterior de la estructura de protección.

Para ensayos estáticos, las fórmulas empleadas para determinar la energía que debe absorber la ROPS, antes de la detención del ensayo son:

- Para los ensayos trasero y delantero:

$$E_{IL} = 0,5M + 500 \text{ (J)}$$

- Para el ensayo lateral:

$$E_{IS} = 1,75M [(B_b + B)/2B] \text{ (J)}$$

3.3.2.2.5. *Equivalencia entre las directivas CE y los códigos de la OCDE*

La Directiva 2003/37/CE (2003) estableció la equivalencia entre los códigos de ensayo de la OCDE y las directivas CE, específicas para cada caso (Rondelli y Guzzoni, 2010).

3.3.2.3. *Las normas SAE*

La Sociedad Americana de Ingenieros de Automoción (SAE) desarrolló unas normas para el ensayo de ROPS montadas en los distintos tipos de tractores entre las que se pueden destacar la SAE J1194 y la SAE J2194.

3.3.2.3.1. *La norma SAE J1194*

Esta norma se aplica tanto a ensayos dinámicos como a estáticos

Para el ensayo dinámico, no contempla en ensayo frontal y determina la altura desde la que se debe dejar caer la masa impactante, para los ensayos trasero y lateral, mediante la fórmula:

$$H = 1,15 * (0,017M_{kW} + 125) \text{ (mm)}$$

Donde M_{kW} es el valor máximo entre la masa máxima fijada por el fabricante o la que asegura una relación mínima entre la máxima y la potencia máxima en la toma de fuerza a una determinada velocidad del motor de 67kg/kW. La masa incluye la ROPS, los combustibles y cualquier otro componente necesario para el normal uso del tractor (SAE Standards, 1999).

Para el ensayo estático, la norma SAE J1194 define una secuencia de tres ensayos que coinciden con tres de los cuatro ensayos definidos en el Código 4. El primer y segundo ensayos son de carga longitudinal y lateral, equivalentes al primer y tercer

ensayos definidos en el Código 4, aunque el momento de la detención de los ensayos está determinado por unas fórmulas diferentes.

El tercer ensayo es similar al cuarto ensayo definido en el Código 4, aunque el valor de la carga vertical está definido por una fórmula diferente. Las condiciones de aceptabilidad son las mismas que el Código 4 aunque la zona de seguridad es diferente en el ensayo lateral, porque, tal y como se ve en la figura 10, la distancia entre el extremo de la zona de seguridad y el plano longitudinal del tractor es de tan solo 50 mm, mientras que en la zona de seguridad, definida en el Código 4, es de 100 mm, como se observa en la figura 11. De la misma forma, el punto de referencia del asiento (SRP), al que está referida la zona de seguridad, está definido de forma diferente a como lo está el SIP en el Código 4, pues se obtiene a partir de las tangentes en la parte superior de la carrera de suspensión y en el punto más alto de la parte resistente del cojín del asiento, como se ve en las figuras 10 y 11. La diferencia en las definiciones del SRP, en la SAE J1194 y el SIP, en el Código 4, compensa, en parte, la diferencia entre las zonas de seguridad definidas en las dos normas.

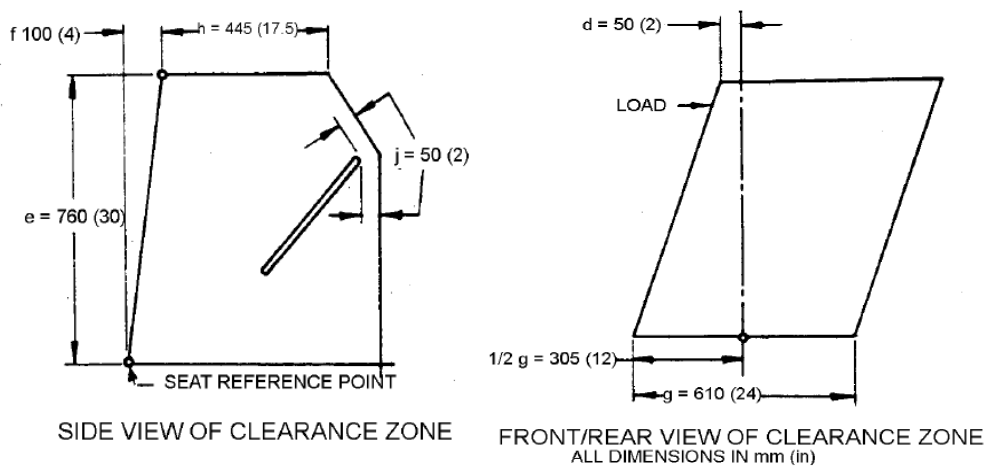


Figura 10.- Zona de seguridad definida en SAE J1194

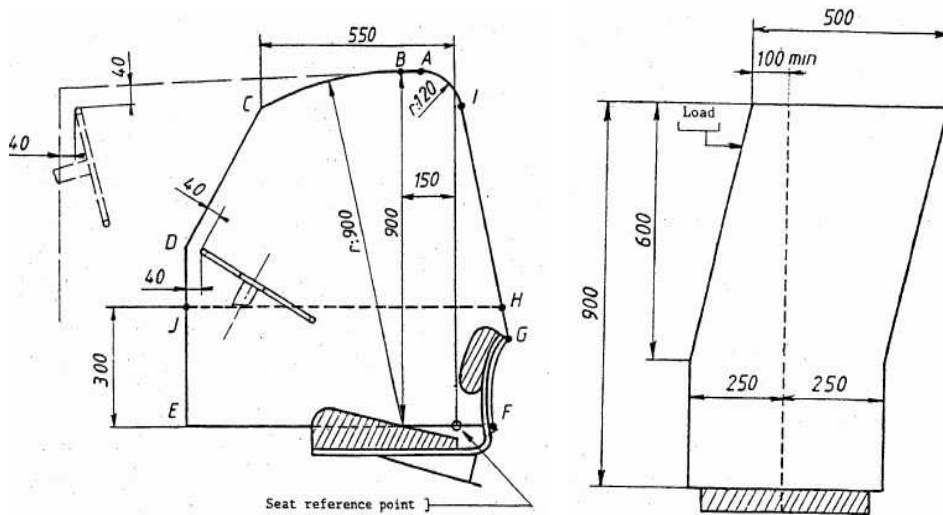


Figura 11.- Zona de seguridad definida en el Código 4

Las fórmulas que determinan la energía que la ROPS debe absorber, antes de la detención del ensayo son:

- Para el ensayo trasero:

$$E_{IL1} = 1,4M_{kW} (J)$$

- Para el ensayo lateral:

$$E_{IS} = 1,2M_{kW} + 980 (J)$$

- Para el ensayo de aplastamiento:

$$F = 15M_{kW} (J)$$

3.3.2.3.2. La norma SAE J2194

La norma SAE J2194 define la misma secuencia de ensayos y utiliza las mismas fórmulas que el Código 4. La masa de referencia es un valor no inferior a la masa en vacío del tractor que se define como la masa del tractor en estado operativo, con los depósitos y el radiador llenos, con la estructura de protección montada y con su

correspondiente revestimiento y con cualquier equipamiento de las ruedas o componentes adicionales para las ruedas tractoras delanteras necesarios para soportar el peso estático del tractor.

3.3.2.4. Comparación de los distintos códigos y normas de ensayo

Como se ha dicho, los primeros ensayos de tractores fueron dinámicos lo que se asemeja a un vuelco real que también es dinámico. Sin embargo, el método dinámico tiene una serie de limitaciones como una baja repetitividad de los ensayos, cierto peligro para los operarios que realizan los ensayos y la destrucción completa del chasis de los tractores en el caso de que su diseño sea poco robusto (Rondelli y Guzzomi, 2010)

Gasparetto et al. (1987) compararon las fórmulas utilizadas en los diferentes códigos y normas de ensayo y pusieron de manifiesto que los parámetros utilizados en las fórmulas de las normas de la OCDE, las normas ISO (International Organization for the Standardization), EEC (European Economic Community), SAE y OSHA (Occupational Safety and Health Administration) para el ensayo de las ROPS son la masa, la batalla, el ancho de vía mínimo y el momento de inercia respecto al eje trasero. Estos autores expresaron que la masa del tractor es el parámetro más determinante en las fórmulas de todas estas normas y que, con la excepción de las normas SAE y OSHA, la masa utilizada era la masa en vacío a pesar de que sobre los tractores actúa, además de su propio peso, el peso del lastre que podía llegar hasta el 50-60% de su masa en vacío, el de los aperos delanteros o traseros, la acción vertical de la lanza del remolque, la fuerza que los aperos realizan sobre la barra del tractor y la fuerza de inercia durante la aceleración o el frenado.

Consideraron que una combinación de estas fuerzas puede causar una sobrecarga peligrosa por lo que las formulas incluían un cierto sobredimensionamiento que, hasta ese momento, había producido resultados satisfactorios, aunque esto hacía que las ROPS de los tractores poco lastrados estuvieran sobredimensionadas mientras que para otras, las fórmulas estaban muy ajustadas. En algunas normas, las fórmulas correspondientes al ensayo trasero incluyen una proporcionalidad con el cuadrado de la batalla o con el momento de inercia respecto al eje trasero. Esta proporcionalidad se

consideró cuando se definieron las fórmulas, pero hacía más severa la fórmula para los tractores de mayor batalla y para los tractores de doble tracción. El ancho mínimo de vía no se ha usado en las fórmulas aunque determina la norma que debe aplicarse. Existe una gran diferencia entre los ensayos dinámicos y estáticos porque la fijación del tractor al suelo es diferente. En los ensayos estáticos la unión es rígida y la ROPS absorbe toda la energía del ensayo, considerada como el 50% de la energía dinámica desarrollada durante el vuelco del tractor. En los ensayos dinámicos la forma de fijar el tractor al suelo está normalizada y un fabricante podría variar el nivel de exigencia del ensayo variando la rigidez, diámetro y anchura de los neumáticos.

Respecto a la energía intercambiada en los ensayos, resaltaron que en el ensayo dinámico, el péndulo impacta la estructura cuando el ángulo que forma la cadena con la vertical es de 20°, lo que implica que la energía total aumenta, a medida que aumenta la deformación total de la estructura. A partir de los datos obtenidos en los ensayos realizados entre 1975 y 1985 sobre 365 tractores de entre 600 y 6.000 kg de masa, concluyeron que el aumento de la energía desarrollada en un ensayo trasero para un tractor de 5.000 kg fue del orden de un 5-10%, lo que no es despreciable y que, para un tractor de 1.000 kg, este aumento puede oscilar entre un 50 y un 200%. Las directivas CEE tuvieron en cuenta este hecho, estableciendo que el ángulo de las cadenas, expresado en grados sexagesimales, debe ser equivalente al cociente entre la masa expresada en kilos y el valor 100, hasta un máximo de 20°.

En este mismo trabajo se comparó la energía que debe ser absorbida durante los ensayos, trasero, frontal y lateral, de acuerdo a los códigos y normas OCDE Código 3, OCDE Código 4, Directiva 86/298/CEE para ensayos estáticos y dinámicos para tractores estrechos con arcos traseros, Directiva 87/402/CEE para ensayos estáticos y dinámicos en tractores estrechos con arcos delanteros, Directiva 77/536/CEE para ensayos dinámicos para tractores normales, Directiva 79/622/CEE para ensayos estáticos para tractores normales, norma SAE J1194 para ensayos estáticos y dinámicos, y norma ISO 3471 para ensayos estáticos para tractores de cadenas.

Respecto a la energía que debía ser absorbida durante los ensayos traseros, comprobaron que era muy diferente según la directiva CEE considerada. Para tractores de entre 1.500 y 3.500 kg, el fabricante podía elegir entre dos fórmulas, previstas en la Directiva 77/536/CEE. La energía calculada usando una fórmula es, para un tractor de 3.500kg, alrededor de dos tercios mayor que la calculada usando la otra fórmula y en el caso de utilizar la fórmula del ensayo estático, esta energía aumenta hasta llegar a aproximadamente el doble.

En la mayoría de los países de Europa los fabricantes podían elegir entre los s de ensayo de la OCDE, dinámico y estático, con un límite de masa que en la práctica era de entre 6.000 y 7.000 kg para tractores normales y entre 1.500 y 3.500 kg para tractores estrechos.

Las energías calculadas utilizando las fórmulas de las directivas CEE, correspondientes a los ensayos dinámicos y estáticos para tractores estrechos con arcos traseros, son idénticas, aunque la energía absorbida en el ensayo dinámico es algo mayor si se considera el incremento adicional correspondiente a la variación del ángulo de la cadena que depende de la deformación total del arco. Las energías calculadas utilizando las fórmulas dinámica y estática, correspondientes a los arcos delanteros son similares. Estos autores concluyeron que realizando la comparación entre las fórmulas utilizadas para los arcos delanteros y traseros, el ensayo de los arcos traseros es más exigente que el de los delanteros para tractores de más de 2.000 kg y menos exigente para tractores más ligeros. Una conclusión de este trabajo fue que esta mayor exigencia de las directivas CEE, para los arcos delanteros montados sobre los tractores más ligeros, no está justificada porque el vuelco trasero de un tractor muy estrecho y muy ligero es casi imposible y, además, en un estudio realizado en Italia en los años setenta, se demostró que los vuelcos traseros de los tractores articulados terminaban en un vuelco lateral.

Otras conclusiones fueron que las mayores energías son las requeridas por la norma SAE J1194 y que carecía de sentido que la directiva CEE para ensayos dinámicos tuviera un límite superior de 4.500 kg mientras la correspondiente directiva para arcos traseros era ilimitada. En 1989, tal y como se ha dicho, la Directiva

89/680/CEE, de 21 de diciembre de 1989, amplió el ámbito de aplicación de esta norma a los tractores de hasta 6.000 kg

Respecto al ensayo frontal, señalaron que sólo era considerado por seis de las once normas citadas, que las incoherencias eran menores que las encontradas para el ensayo trasero, que la energía que deben absorber los tractores de menos de 2.000 kg es menor para los tractores estrechos, ocurriendo lo contrario en el caso de tractores pesados de más de 4.000 kg, y que no está clara la razón para que las fórmulas de las dos directivas para tractores estrechos no sean idénticas.

Para el ensayo lateral, las energías que deben ser absorbidas presentan muchas incoherencias, aun sin considerar la norma ISO 3471. La directiva para ensayos dinámicos en tractores estrechos con arcos delanteros determina que la altura desde la que se deja caer el péndulo dependa del cociente entre la anchura total del armazón de la cabina y la anchura mínima del tractor. Un valor de 0,8, para este cociente, favorece a los tractores estrechos pesados (2.500-3.500 kg) respecto a los más ligeros y pequeños, en los que el valor de este cociente podría ser cercano a 1. Las directivas CEE para ensayos estáticos no exigen absorber la misma energía para los arcos delanteros y los traseros. También resaltaron que algunas fórmulas requieren la absorción de una gran cantidad de energía incluso para una ROPS montada sobre un tractor de masa cero lo que produce una gran diferencia en la energía que deben absorber las ROPS montadas sobre los tractores ligeros. Ponían como ejemplo que para un tractor de 1.000 kg, el Código 3 exigía la absorción, por la ROPS, de un 50% más de energía que el Código 4 y lo mismo sucedía para tractores normales, de más de 1.500 kg, ensayados según las directivas CEE para ensayos dinámicos y estáticos. Estas diferencias se reducen a un ligero porcentaje cuando se aplican las fórmulas a tractores pesados de 5.000 a 6.000 kg. Estos autores indicaron que en este caso, tampoco está clara la razón para no adoptar una sola fórmula, criterio que fue aceptado posteriormente cuando en 1987, la Directiva 77/536/CEE fue modificada por la Directiva 87/354/CEE de 15 de junio de 1987, estableciendo una sola fórmula para todos los ensayos dinámicos traseros.

De las gráficas contenidas en este trabajo (figura 12) se desprende que el Código 3 y la Directiva 77/536/CEE, para ensayos dinámicos de tractores estrechos, son los más exigentes para tractores ligeros de hasta 4.500 kg, que la norma SAE J1194, para

ensayos dinámicos, tiene un nivel de exigencia similar a ésta para tractores ligeros, aunque tiene una menor exigencia para tractores de más de 4.500 kg. Las normas más exigentes para tractores de más de 4.500 kg son el Código 4 y la Directiva 79/622/CEE, para ensayos estáticos sobre tractores normales. La norma SAE J1194, para ensayos estáticos es más exigente que éstas para tractores ligeros, pero menos exigente para los tractores pesados. La norma ISO 3471 para ensayos estáticos de tractores de cadenas, es mucho menos exigente que las demás normas para cualquiera de los tractores ensayados en este trabajo.

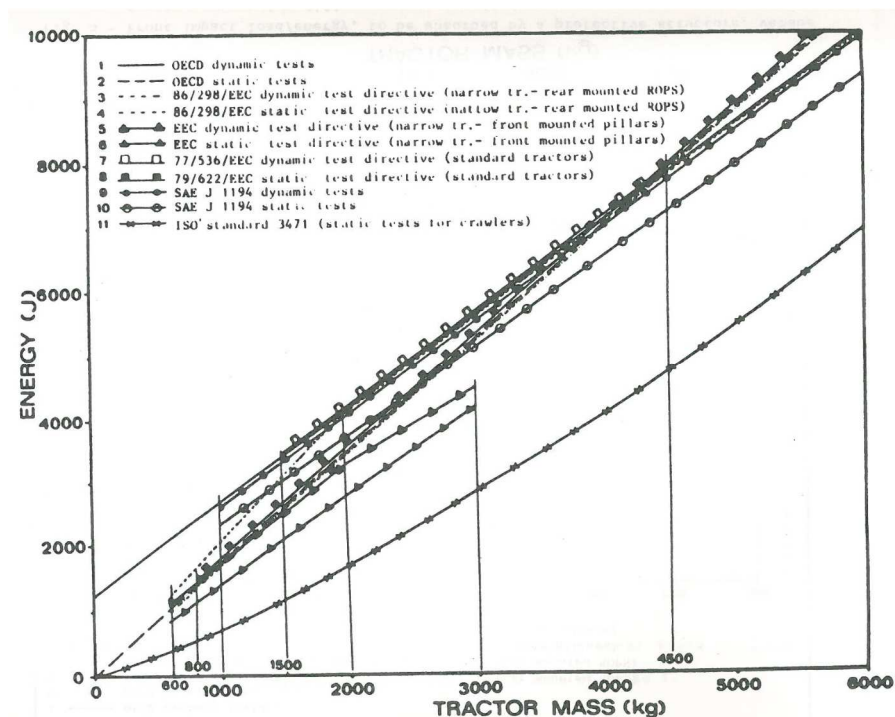


Figura 12.- Energía que debe ser absorbida por la ROPS en el ensayo lateral en función de la masa del tractor y la metodología de ensayo

Guarneri et al. (1993) calcularon la energía teórica de los vuelcos laterales de doce tractores y la compararon con las energías estática y dinámica fijadas por los códigos CEE, encontrando que existía una gran variabilidad en la relación entre la energía teórica del vuelco y la energía fijada en el código estático, para cada modelo de tractor y lo mismo sucedía para la energía fijada en el código dinámico. Concluyeron que existía la necesidad de revisar las fórmulas impuestas por el código dinámico porque el factor de forma $F_c = (B_b + B)/2B$, incluido en la fórmula, parece no ser adecuado para representar el comportamiento dinámico de los tractores durante su vuelco.

Jarén et al (2009) señalaron que, debido al gran aumento del lastrado de los tractores en los últimos años, la gran diferencia entre las distintas normas que regulan los ensayos estáticos, radica en la utilización, como masa de referencia en las diferentes fórmulas, de distintos valores de la masa del tractor. De esta forma, la norma SAE J1194 para ensayos estáticos utiliza en las fórmulas que especifican la energía que debe absorber la ROPS antes de la detención de los ensayos de carga longitudinal, una masa muy similar a la masa máxima admisible, establecida por el fabricante para cada modelo de tractor, mientras que la norma SAE J2194 para los ensayos estáticos y el Código 4 utilizan en sus fórmulas, la masa de referencia, que suele ser la masa en vacío del tractor y lo mismo sucede, en los ensayos de aplastamiento, con las cargas verticales que deben soportar las ROPS.

Los citados autores utilizaron 300 modelos de tractor para comparar la seguridad que procuran las distintas metodologías de ensayo y concluyeron que la norma SAE J1194 procura una mayor seguridad real que el Código 4 a los tractores con un lastre superior al 35% de su masa en vacío, que esta norma es más exigente con los tractores ligeros que con los pesados, que como la energía de un vuelco está determinada por la masa instantánea del tractor y, debido al gran lastrado de los tractores puede ser muy superior a la masa en vacío, la metodología de la norma SAE J1194 se adapta mejor que el resto de las metodologías a la situación actual. Por otra parte, el Código 4 procura el mismo nivel de seguridad para los tractores ligeros y pesados pero, como el nivel de seguridad real depende del cociente entre la masa máxima admisible y la masa en vacío, este Código es válido para tractores moderadamente lastrados pero su validez es dudosa para los tractores muy lastrados.

Los propios autores señalaron que la comparación no era totalmente rigurosa porque existen dos diferencias entre las zonas de seguridad definidas por la norma SAE J1194 y el Código 4. Estas diferencias se compensan en parte y se refieren a la distinta situación del punto indicativo del asiento (SIP), definido en el Código 4 y el punto de referencia del asiento (SRP), definido en la norma SAE J1194. La primera diferencia permite una mayor deformación de la ROPS, durante el ensayo lateral, que es el crítico, definido por la norma SAE J1194, lo que reduciría el nivel de exigencia de esta norma, pero esta diferencia no tiene excesiva importancia porque en los accidentes mortales en los que tractores con ROPS homologadas han causado la muerte del tractorista no se ha

producido una deformación excesiva de la ROPS sino su colapso y su deformación total.

Scarletty Reed (2009) investigaron el probable grado de seguridad que las ROPS aprobadas proporcionan a los tractores más pesados, de entre 6.000 y 12.000 kg de masa y concluyeron que la capacidad de lastrado de muchos tractores modernos se ha incrementado dramáticamente desde que se desarrolló el criterio que rige los actuales ensayos y que los actuales códigos de la OCDE y ciertas normas ISO permiten una indeseable flexibilidad en la elección de la masa de referencia, por lo que el “safety margin” se reduce progresivamente a medida que aumenta la masa del vehículo. Recomendaron modificar los actuales códigos incorporando algún tipo de vinculación directa entre la masa máxima admisible y la masa de referencia y considerar una revisión al alza de la fórmula que determina el momento del fin del ensayo lateral para los tractores mayores de 8.500-9.000 kg de masa en condiciones de trabajo.

3.3.2.5. Consideraciones y propuestas de mejora

Alfaro et al. (2010) comprobaron que los códigos y normas de ensayo de ROPS no aseguraban suficientemente la seguridad de los tractores fuertemente lastrados y usaron un programa de elementos finitos para desarrollar un procedimiento, denominado “MARMO” para calcular el valor máximo de la masa que, usada como masa de referencia en las fórmulas del Código 4 y la SAE J2194, llevarían a un resultado positivo de los correspondientes ensayos de carga longitudinal y aplastamiento. Utilizando este procedimiento evaluaron la validez de estas dos normas de ensayo y pudieron comprobar que estas normas no procuran, en todos los modelos de tractor, el suficiente nivel de seguridad real.

Estos resultados fueron discutidos en las distintas reuniones del grupo de expertos en seguridad en el sector agrícola, representantes de los países miembros de la OCDE y, concretamente en la reunión de enero de 2009, celebrada en París, se estableció el término “safety margin” que es el margen de seguridad que proporciona el ensayo y que representa la relación (M/M_{\max}) entre la masa utilizada como referencia en las fórmulas

que definen el ensayo, normalmente la masa en vacío (M) y la masa máxima admisible en el tractor (M_{\max}), fijada por el fabricante (OCDE, 2010).

Rondelli y Guzzomi (2010) comprobaron, en un estudio sobre los ensayos de 13 tractores normales y 11 tractores estrechos, que aunque los tractores podían tener masas de referencia similares y por lo tanto requerimientos similares en los ensayos, su lastrado y sus masas máximas podían ser muy diferentes. Concluyeron que la masa de referencia determinaba diferentes “safety margins” dependiendo del modelo de tractor considerado.

Guzzomi et al. (2009) evaluaron la energía del vuelco lateral, sobre planos diferentes, de 102 modelos de tractor estrecho equipados con arcos delanteros y concluyeron que no existe una relación lineal entre esta energía disponible y la masa del tractor. Scarlett y Reed (2009) concluyeron que en un vuelco lateral desde 2,5 metros de altura, que puede considerarse como un vuelco severo, el Código 4 sobrevalora el nivel de energía para tractores de hasta 9.500- 9.700 kg, pero la infravalora para tractores más pesados, lo que está de acuerdo con la afirmación de Chisholm (1979c), quien publicó que la energía absorbida por las ROPS podría incrementarse con la masa según una relación polinomial de bajo orden.

El Grupo Científico de Trabajo de la OCDE presentó un Informe [TAD/CA/T/(2011)4/REV1] en el que se discutió la introducción un límite inferior para la masa de referencia, estableciendo una relación entre este valor y la masa máxima admisible del tractor (Ponce de León et al., 2008) o la de un límite superior para la masa máxima admisible, función de la masa de referencia utilizada en los ensayos. Finalmente, la propuesta consistió en la incorporación, al ensayo definido por el Código 4, de un límite máximo para el índice de masa, definido mediante modificaciones en las secciones del Código 4 que se refieren a definiciones, campo de aplicación, especificaciones del informe del ensayo y especificaciones del informe de extensión técnica. En la Sección 1.- Definiciones, se propuso incluir la definición de masa máxima admisible como la masa máxima operativa del tractor autorizada por el fabricante y declarada en la placa de identificación del vehículo o en su manual de operaciones, y la definición de masa de referencia como la masa elegida por el fabricante para calcular los valores de energía y fuerza de aplastamiento que deben ser usados en los ensayos.

También se propuso introducir, además de que esta masa de referencia no debe ser menor que la masa en vacío del tractor, el texto: *“adicionalmente, el cociente entre masa máxima admisible y la masa de referencia no debe ser superior a 1,75. Esta última condición también debe ser incorporada al campo de aplicación del Código 4.”*

Arana et al. (2011) desarrollaron una propuesta de mejora del Código 4 y de la norma SAE J1194. El objetivo de esta propuesta era conseguir para todos los tractores ensayados, usando una nueva metodología, un nivel suficiente y homogéneo de seguridad al vuelco. Todos los tractores, ensayados con esta nueva metodología, tendrían el mismo “safety margin” que sería el 35% ($M_{\max}/M = 1,35$) y este “safety margin” sería el que tiene un modelo de tractor ensayado, usando las actuales normas (SAE J2194 y Código 4), que tuviera un lastrado máximo equivalente al 35% de su masa en vacío.

Estos autores refirieron que las actuales normas han funcionado correctamente y han salvado muchas vidas pero que en los últimos años la capacidad de lastrado ha aumentado mucho, como pusieron de manifiesto Scarlett y Reed (2009), quienes afirmaron que las investigaciones realizadas en los años setenta, de las que se derivaron los actuales criterios de ensayo, estaban focalizadas principalmente en tractores de esa época, de dos ruedas motrices y de limitada capacidad de lastrado, mientras que, en los últimos años la capacidad de lastrado ha aumentado en gran medida como demuestra el hecho de que la Directiva 2006/26/CE elevó el valor del límite máximo de la masa admisible de los tractores desde 14.000 a 18.000 kg (Rondelli y Guzzomi, 2010). En un informe del Grupo de Trabajo Científico de la OCDE [TAD/CA/T/(2011)4/REV1] se comprueba que en los años setenta, la mitad de los modelos de tractor presentaba un lastrado máximo inferior al 50% y ningún modelo sobrepasaba el 67%, mientras que en los años 2000, la mitad de los modelos sobrepasaba el 73% de lastrado admisible y un modelo ya sobrepasaba el 98%. Los representantes de la administración española en este Grupo de Trabajo presentaron un informe relativo a un accidente mortal, ocurrido en España. El tractor tenía una ROPS, debidamente homologada, y colapsó catastróficamente durante un vuelco, cuando la masa instantánea del tractor estaba dentro de las directrices del fabricante, aunque era casi el doble de su masa en vacío [AGR/CA/T/(2007)7].

Ponce de León et al. (2008) informaron que el importante aumento de la capacidad de lastrado de los últimos años, hacía que la seguridad de las actuales normas de ensayo de las ROPS fuera dudosa para los tractores muy lastrados y que se podía clasificar los modelos de tractor ensayados, respecto a su nivel de seguridad real, en una zona segura, correspondiente a un lastrado del 35% respecto a la masa de referencia usada, en la zona incierta, con entre un 35% y un 75% de lastrado y en la zona insegura, con más de un 75% de lastrado. También reflejaron que el porcentaje de tractores ensayados en España, pertenecientes a la zona insegura, pasó del 7% al 39% de 1986 a 2006.

Para que la nueva metodología propuesta proporcione un nivel de seguridad real idéntico para todos los modelos de tractor ensayados, es necesario modificar la variable dependiente de las fórmulas que, en los códigos y normas, establecen el valor de la energía que debe ser absorbida por la ROPS antes de la detención de los ensayos de carga longitudinal y el valor de la fuerza ejercida durante los ensayos de aplastamiento.

Es necesario utilizar en las fórmulas el valor de la masa máxima admisible y que éste sea el equivalente al que tiene un modelo de tractor, ensayado con las actuales normas, con un 35% de lastrado admisible. Las fórmulas propuestas son:

- Para el ensayo trasero:

$$E_{IL1} = 1,1M_{\max} \text{ (J)}$$

- Para el ensayo lateral:

$$E_{IS} = 1,3M_{\max} \text{ (J)}$$

- Para el ensayo de aplastamiento:

$$F = 15M_{\max} \text{ (J)}$$

3.3.3. El diseño de las ROPS

En 1973, Moberg publicó un resumen de experiencias en el Instituto Nacional Sueco para la Maquinaria Agrícola en el que decía que el primer armazón comercial de seguridad diseñado para procurar la necesaria protección contra el aplastamiento para el tractorista se produjo en 1954 (Moberg, 1973). En 1952, un granjero de Kentucky solicitó una patente para un sistema, montado en un tractor, para proteger al conductor de las consecuencias de un vuelco (Maybrier, 1956). En 1956 se desarrolló en el Servicio de Extensión Agrícola de la Universidad de California, en Davis, un armazón de seguridad para el tractorista (MacCollum, 1984) y al final de los años cincuenta se desarrolló en Nueva Zelanda la tecnología de una barra antivuelco (Crosbie, 1961). En 1962, se ensayó en Michigan una barra que impedía la evolución a más de 90° del vuelco lateral del tractor (Bucheale, 1962) y, en 1963, en Gran Bretaña se solicitó una patente para una barra diseñada para impedir la rodadura continua lateral del tractor (Duncan, 1966). La necesidad de utilizar ROPS en el sector agrícola no fue reconocida formalmente por los fabricantes de maquinaria agrícola hasta algunos años más tarde (Gelhausen, 1991). En 1966, el tractor John Deere 4020 fue el primer modelo de tractor en USA que incluía una ROPS (Stockton et al. 2002).

Muchas empresas de equipamiento comenzaron a investigar en el desarrollo de las ROPS al principio de los años sesenta, cuando se desarrollaron las primeras normas. Yeh et al. (1976) de la International Harvester Company, describió la esencia del diseño de las ROPS: la estructura y su acoplamiento debe ser resistente y suficientemente flexible para absorber la energía requerida sin invadir la zona de seguridad. Él y sus colaboradores desarrollaron el programa informático Structural Analysis Program for Roll-Over Protective Structures (SAPROPS), usando el modelo de simulación de la “rodilla plástica”. Compararon los resultados del ensayo realizado según la norma SAE J334 con los de la simulación comprobando que la carga obtenida en la simulación, en el momento de la detención del ensayo, era un 10% menor que la obtenida en el ensayo mientras que la deformación era un 4% mayor que la del ensayo y que, en general las ROPS eran más flexibles de lo que parecían en la simulación.

La forma en que las ROPS deben resistir los impactos que se producen en los vuelcos, consistente en una combinación de resistencia y deformabilidad, se basa en el mismo principio que las murallas galas, que se construían con capas alternas de madera y piedras de forma que la madera aportaba la resistencia y las capas de grava/arena absorbían la energía del impacto del ariete, cuando las golpeaba para derribarlas (Caerols Pérez, 2010).

Las ROPS se diseñan teniendo en cuenta parámetros del tractor en que van a ser montados, como su masa, altura, posición del centro de gravedad y momento de inercia (Silleli et al., 2007). El objetivo fundamental que persigue el diseño de las ROPS es la protección del tractorista en caso de vuelco. Como los códigos de ensayo simulan los vuelcos que pueden ser considerados como normales y debido a la obligatoriedad de homologación de los tractores que exige un resultado positivo de los ensayos de homologación, las ROPS pueden llegar a ser diseñadas específicamente con el objetivo de obtener dicho resultado positivo.

Es necesario distinguir entre los nuevos modelos de tractor que tienen una ROPS o cabina de seguridad y los tractores que fueron fabricados y comercializados sin estructura de protección al vuelco y que, a menudo se denominan tractores pre-ROPS. Un tractor pre-ROPS es un tractor que fue fabricado sin montarle una ROPS diseñada para acoplarse a sus semiejes traseros o a su chasis (Myers y Snyder, 1995).

Se han utilizado distintas técnicas para diseñar y dimensionar las ROPS. Las estructuras de protección deben acoplarse a puntos del tractor lo suficientemente resistentes para que no cedan en caso de vuelco, porque, en caso contrario, las estructuras no cumplen su función. En Alemania se construyeron cabinas que no estaban ancladas rígidamente al eje trasero de los tractores sino que se unían a él mediante una suspensión elástica, de cuatro puntos, de goma o de tipo paralelogramo trabajando a torsión (Gasparetto, 1968).

El desarrollo de la informática permitió la utilización de programas de cálculo, normalmente por elementos finitos (EF), para predecir las deformaciones de las ROPS y para realizar su diseño. Rusinski (1987) diseñó una cabina de materiales laminados usando la metodología de elementos finitos. Rehkugler et al. (1975) describieron la

utilización de un dispositivo, denominado SIMTRAC, para simular los vuelcos de los tractores. Hopkins y Walters (1979) refirieron el uso de dos programas informáticos, basados en las teorías elástica y plástica, para predecir las deformaciones. Wardill (1979) describió la aplicación de un programa EF para predecir el comportamiento de una ROPS, en su colapso, con atención especial a los grandes desplazamientos no lineales. Chisholm (1979d) combinó un modelo matemático y una serie de experimentos a escala real para establecer un criterio para el diseño y el ensayo de las ROPS. Hunckler et al. (1985) se refirieron al uso de un análisis por EF para ayudar al diseñador de ROPS a encontrar el mejor punto entre su rigidez y su flexibilidad. Wen et al. (1994) desarrollaron un modelo, basado en EF, para estimar la resistencia de los semiejes traseros de un tractor John Deere 720, que carecía de ROPS por ser anterior a la obligatoriedad de ser instaladas en todos los tractores y que podría ser el mejor punto de anclaje de una ROPS. Pessina y Radovan (1994) simularon los efectos de las acciones realizadas durante los ensayos estáticos especificados por el Código 4 sobre una estructura de 4 postes montada sobre un tractor comercial.

Se simularon las acciones de las cargas traseras, laterales y verticales usando un proceso basado en Computer Automatic Design (CAD) y el modelo fue desarrollado bajo el parámetro de elementos finitos. Las curvas fuerza-deformación obtenidas, usando el modelo EF fueron muy similares a las recogidas en el ensayo oficial, por lo que estos autores propusieron la utilización de este modelo para los casos en que el ensayo oficial no es posible, como en el caso de estructuras montadas en tractores usados que fueron comercializados sin ROPS (pre-ROPS). Ayers et al. (1994) desarrollaron un programa informático para predecir las deformaciones en ROPS de uno y dos postes, comprobando que el modelo conseguía su objetivo pero era menos exigente que los ensayos de laboratorio. A partir de estos resultados, concluyeron que el modelo podía ser usado, en combinación con el análisis EF para predecir los valores fuerza/deformación y ayudar en el diseño de las ROPS. Ayers (1997) diseñó, construyó y ensayó ROPS para tractores pre-ROPS. Además del ensayo de campo se realizaron ensayos estáticos de carga longitudinal trasera, lateral y vertical, de acuerdo a la norma ASAE S519.

Se clasificaron los semiejes traseros de los tractores en tres clases de acuerdo a su resistencia y a la facilidad o dificultad que presentan para montar una ROPS sobre ellas, y se construyeron ROPS para adaptarlos a las tres clases de semiejes

Kawakami et al. (1998) aconsejaron el uso de ayuda informática para reducir el tiempo y el coste del desarrollo de las ROPS. Harris et al. (2000) compararon las deformaciones que se producen en las ROPS durante la secuencia de ensayos estáticos definida en la norma SAE J2194 con las producidas por un vuelco trasero simulado. Usaron un programa de elementos finitos con capacidad de deformación plástica para simular tanto el ensayo estático como el dinámico y pudieron concluir que, en el peor de los casos, el modelo estático predijo deformaciones menores, en un 7%, que las predichas por el modelo dinámico, mientras que, en el mejor de los casos, este modelo estático predijo deformaciones mayores, en un 32%, que las predichas por el modelo dinámico. A partir de estos resultados, estos autores sugirieron la necesidad de continuar las investigaciones sobre los niveles de estrés a que son sometidas las ROPS durante los vuelcos o los ensayos, lo que puede ser determinante para el diseño de las ROPS. Fabri y Ward (2002) desarrollaron un programa de elementos finitos para simular el comportamiento de las ROPS, durante los ensayos definidos por los códigos de la OCDE. Aplicaron el método para estudiar el comportamiento de una barra horizontal fija en sus extremos y cargada con una carga vertical uniforme, un voladizo horizontal con una carga vertical en su extremo libre, una viga en voladizo con una carga puntual, un arco de seguridad de dos postes verticales, un arco trasero de seguridad con vigas verticales que incluyen un tramo vertical y un tramo inclinado hacia adelante y un armazón de seguridad. Estos autores concluyeron que el modelo de elementos finitos desarrollados es capaz de simular el comportamiento elástico-plástico, en tres dimensiones de las ROPS más habitualmente montadas en los tractores y puede ser usado para evaluar los efectos que, sobre ellas, pueden producir los ensayos definidos en los códigos de la OCDE. Esto puede simplificar, en gran medida, el diseño de las ROPS y el programa de elementos finitos puede ser usado por fábricas de tractores de tamaño medio o bajo, debido a que requiere un relativamente pequeño entrenamiento.

Mangado et al. (2007b) desarrollaron un programa informático, denominado “ESTREMA” capaz de diseñar y dimensionar estructuras de protección que pudieran montarse en la mayoría de modelos de tractor que carecen de ellas. Estas ROPS deberían ser capaces de superar un ensayo similar al que son sometidas las ROPS montadas en los modelos comerciales de tractor cuando son homologados los modelos de tractor equipados con ROPS, de acuerdo al correspondiente código de ensayo de la OCDE. Las ROPS debían poder anclarse a unos puntos del tractor lo suficientemente resistentes para asegurar que durante los vuelcos, o los ensayos, no colapsa la parte del tractor a la que se ancla la ROPS. Como en la mayoría de modelos de tractor pre-ROPS, los únicos puntos lo suficientemente resistentes para no colapsar durante el vuelco son los semiejes traseros, las ROPS se diseñaron para ser ancladas en dichas semiejes. El diseño es una estructura de cuatro postes unidos por barras horizontales que en su parte inferior se unen dos a dos en el semieje del lado correspondiente. En la figura 13 se puede ver una ROPS diseñada, usando este programa ESTREMA. El programa es capaz de dimensionar las secciones de las barras que componen la estructura y el número y dimensión de los tornillos de anclaje de la estructura a los semiejes.

Utilizando este programa, Mangado et al. (2007b) diseñaron la estructura de protección, mostrada en la figura 13, que fue montada en un tractor Massey Ferguson 178 (MF178), que es uno de los modelos de tractor sin ROPS más común en España. Además construyeron la ROPS diseñada y la montaron en dicho tractor. El tractor MF 178, equipado con la ROPS, fue sometido en la Estación de Mecánica Agraria (EMA), única Estación Autorizada en España para los ensayos de homologación de tractores, a la misma secuencia de ensayos a la que son sometidos los modelos de tractor comerciales de acuerdo al Código 4. Como el resultado de los ensayos fue positivo se pudo concluir que la ROPS diseñada, usando el programa “ESTREMA”, proporcionó a este tractor un nivel de seguridad al vuelco similar al que proporcionan las cabinas comerciales. También se pudo comprobar que los semiejes no se rompieron ni deformaron, durante la secuencia de ensayos, y que los acoplamientos ni giraron sobre los semiejes, ni colapsaron, ni se deformaron apreciablemente por lo que, en este caso, se demostró que los semiejes tenían la suficiente resistencia y unas características que permitían montar sobre ellas la ROPS diseñada. El CEMAGREF (Francia) confeccionó otro programa de cálculo con unas prestaciones similares al descrito.

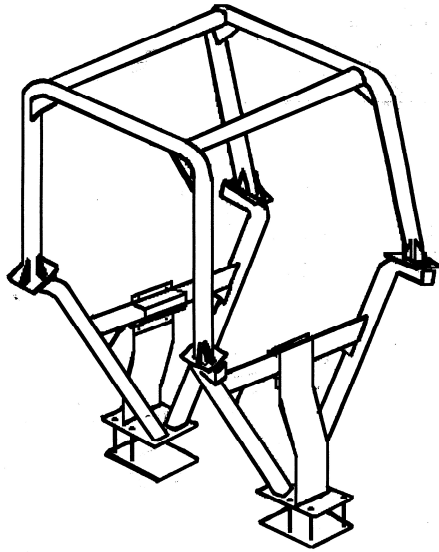


Figura 13.- ROPS diseñada con el programa ESTREMA

Una segunda estructura, diseñada con el programa “ESTREMA” fue montada en el mismo tractor y sometida a un ensayo de vuelco real desde una plataforma de 1,5 metros de altura y sobre un suelo extremadamente duro. El resultado del ensayo fue que la ROPS no colapsó y no se deformó lo suficiente para invadir la zona de seguridad, sino que sufrió una deformación lo suficientemente ligera como para mantener una amplia zona, dentro de estructura, donde cabía perfecta y holgadamente el dummy que se utilizó para simular al tractorista. Como en el ensayo estático, realizado en la EMA, los semiejes en que se ancló la ROPS respondieron positivamente y volvió a demostrarse que se podía anclar en ellas la ROPS diseñada.

De cualquier forma, el tractor MF178 utilizado por los citados autores, tiene unos semiejes de sección cuadrada que facilitan el acoplamiento de ROPS sobre ellas, sin que exista el peligro de que toda la estructura gire alrededor de la semieje en caso de vuelco, y se limite en gran grado su capacidad para defender la zona de seguridad en la que debe permanecer el tractorista durante todo el vuelco.

Sin embargo, muchos modelos de tractor que carecen de ROPS, tienen semiejes redondeados o incluso de sección circular, lo que plantea un grave problema suplementario al diseño de las ROPS que pueden ser montadas sobre estos tractores. Comer et al. (2007) evaluaron la viabilidad del uso de plásticos de ingeniería en el acoplamiento de las ROPS a los semiejes de los tractores pre-ROPS que no tienen una

sección cuadrada o hexagonal. En primer lugar, eligieron el tipo de plástico que se debe emplearen el acoplamiento, basándose en su resistencia y coste (Comer, 2005), tras realizar ensayos de esfuerzo cortante, ensayos con modelos a escala y ensayo de compresión. Después construyeron una caja metálica, para cada semieje, que lo rodea completamente e inyectaron el plástico entre la caja y el semieje, y realizaron un ensayo de torsión fijando con tornillos una viga vertical a la parte superior de la caja de acoplamiento tal y como hizo Ayers (2003) con los semiejes circulares de un tractor John Deere 17 (D-17) y pudieron comprobar que el acoplamiento, diseñado con plástico, mostró una resistencia a la torsión mayor y una torsión menor que los mostrados por el acoplamiento realizado directamente sobre el semieje.

Estos investigadores montaron la ROPS sobre el tractor D-17 que tiene una masa en vacío de 2.118 kg y requiere una energía absorbida de 3.200 J si utilizamos una masa de referencia un 10% mayor de la masa en vacío en un ensayo estático de carga longitudinal trasera conforme a lo establecido por la norma SAE J2194. Después del ensayo de carga trasera se realizó un ensayo de carga lateral hasta absorber una energía de 4.100 J y se comprobó que la estructura fue capaz de resistir los esfuerzos necesarios para satisfacer los requerimientos de energía.

Las deformaciones que se produjeron en la ROPS no hicieron que invadiera la zona de seguridad ni expusieron al tractorista a un hipotético choque contra el suelo. Por último, realizaron un ensayo de vuelco real haciendo ascender el tractor, utilizando su propia energía, a velocidad constante, por una rampa de 60 grados hasta volcar hacia atrás y se comprobó que la deformación de la estructura fue menor que la que se produjo en el ensayo estático.

Harris (2008) diseñó estructuras de protección con un coste ajustado para reducir el coste de dotar de una ROPS a un tractor pre-ROPS. Diseñó y fabricó una ROPS para un tractor modelo Ford 3000. El prototipo fue diseñado mediante la tecnología de elementos finitos y la ROPS fabricada y montada en el tractor fue ensayada de la misma forma en que se ensayan los tractores comerciales, conforme a la norma SAE J2194, y el resultado fue positivo.

Como se ha dicho la integridad de los semiejes donde se acoplan las ROPS que se montan en los tractores pre-ROPS es fundamental. En todos los casos expuestos esta resistencia fue suficiente. Sin embargo, en Iowa (USA) en 2003, ocurrió un accidente mortal registrado en el Programa de Evaluación y Control de Tasas de Mortalidad de Iowa (NIOSH, 2003) en el que la muerte de un joven sucedió cuando, durante un vuelco trasero, se rompió el semieje donde se había soldado un arco casero de seguridad, soldado por el padre del joven que tenía certificación de soldador. En Tudela, en una Autovía por la que pueden circular tractores, en dos ocasiones se produjo la ruptura de los semiejes traseros de dos tractores alcanzados por camiones que circulaban a gran velocidad y golpearon las ruedas traseras derechas de los tractores provocando el colapso de sus semiejes, aunque este tipo de accidente es extraordinariamente exigente con la resistencia de los citados semiejes. En la figura 14 se puede observar el resultado del accidente



Figura 14.- Semieje trasero colapsado en accidente de tráfico

Etherton et al. (2007) estudiaron la posibilidad de utilizar la fibra de vidrio plástica (FPR) en lugar del acero en la fabricación de ROPS. Evaluaron la resistencia de las uniones entre las piezas de FPR de la base y de los extremos superiores de las estructuras y la forma en que la FPR colapsa bajo la acción de cargas estáticas.

Concluyeron que era necesario un anclaje bien atornillado de la estructura en el tractor y la localización de los tornillos que unen las piezas de la estructura, en sus extremos superiores. También comprobaron que los montantes verticales de las estructuras absorbían correctamente la energía sin roturas importantes a lo largo de la fibra y los fallos en el material sólo se produjeron en la base de estos montantes. En los ensayos realizados sobre las ROPS hasta su colapso, se produjeron tres fisuras en el material, en los orificios de los tornillos antes de alcanzar la carga final de 53.370 N. También compararon el comportamiento de las estructuras de FRP y acero respecto a las deformaciones que les produjeron los esfuerzos ejercidos sobre ellas y encontraron que las sufridas por las FRP ROPS eran aceptables. Por todo esto, estos autores concluyeron que es posible diseñar ROPS de FRP que tienen una mayor duración y un menor coste que las de acero.

Arana et al. (2008) desarrollaron otros tres programas informáticos para verificar la imposibilidad de rodadura continua de los tractores estrechos y para dimensionar los arcos de seguridad delanteros y traseros. El primer programa, denominado “VUELCO”, permite diseñar la estructura, calculando las dimensiones mínimas, que garantizan la no rodadura continua del tractor. El programa “DASTEREMA” permite el diseño y dimensionamiento de los arcos delanteros de los tractores y de sus anclajes, mientras que el programa “TASTEREMA” hace lo propio con los arcos montados por detrás del punto indicativo del asiento.

Alfaro et al. (2010) utilizaron un programa de elementos finitos para predecir el comportamiento de las ROPS durante los ensayos estáticos. Utilizaron el programa para evaluar las deformaciones producidas en las ROPS, durante los ensayos y en la prolongación de los mismos hasta su resultado negativo. Pudieron comprobar que en todos los casos estudiados, el resultado negativo se producía por el colapso de las estructuras que lleva a su deformación total y no a una excesiva deformación gradual.

También pudieron comprobar la importancia que tiene la forma en que las estructuras se fijan a los tractores en la seguridad real al vuelco que proporcionan y demostraron que la metodología de elementos finitos podía ser usada para diseñar ROPS más seguras.

3.3.4. Los arcos de seguridad de los tractores

Para los tractores estrechos y ligeros, una cabina o un armazón de seguridad resulta, en la mayoría de los casos, demasiado pesada, voluminosa y cara, por lo que los fabricantes optan por la instalación, en estos tractores, de arcos de seguridad que pueden ser delanteros o traseros según se instalen por delante o por detrás del punto indicativo del asiento. En la figura 15 se observa un arco de seguridad trasero. En el caso de los arcos delanteros, se hace necesario instalar también un elemento resistente por detrás del SIP que asegure la integridad del tractorista, en caso de vuelco. Estos arcos de seguridad están formados, generalmente por dos postes unidos por un travesaño superior, aunque estos postes pueden ser rectos o curvados y verticales o inclinados.

La mayor altura de estos arcos de seguridad proporciona una mayor seguridad de que el tractor no va a realizar una rodadura continua, pero produce mayores momentos, en caso de vuelco, sobre las secciones críticas de estos arcos de seguridad. Una forma de compensar este problema es construir estos arcos con una anchura mayor que, por una parte, impide la rodadura continua con una altura menor y, por otra, admite una mayor deformación, en caso de vuelco lateral. Sollberger y Wust (1975) desarrollaron un arco de seguridad trasero, con disposición en V cerrada superiormente con un travesaño telescópico que permite variar su longitud, introduciendo en mayor o menor medida la pieza central del travesaño en sus dos piezas laterales y sujetándola en la posición (correspondiente a una determinada anchura) elegida mediante cuatro parejas de tornillos pasadores. Esto permite adaptar la estructura a distintos modelos de tractor de diferentes anchuras. Sin embargo, como el cambio de anchura es lento y manual, la configuración del arco de seguridad es fija y actúa únicamente como elemento estático de protección.



Figura 15.- Tractor estrecho con arco de seguridad trasero

3.3.4.1. La zona de supervivencia y el criterio de exposición

En los vuelcos de tractores equipados con estos arcos es necesario tener en cuenta que la ROPS no envuelve completamente al tractorista, protegiendo la zona de seguridad, sino que, en caso de vuelco, el volumen protegido, normalmente denominado zona de supervivencia, está limitado por el arco, deformado durante el vuelco, el tractor y el terreno. Por esta razón, es muy necesario tener en cuenta el criterio de exposición, definido en las normas ASAE S519 y SAE J2194, que describe un posible resultado negativo del ensayo que se daría en el caso de que la zona de seguridad quedase expuesta, durante el ensayo, al plano del suelo. Ayers et al. (1994) desarrollaron un programa FORTRAN para determinar si la zona de seguridad quedaba expuesta a la superficie del suelo cuando la ROPS se deformaba durante el ensayo estático y concluyeron que se podía utilizar este modelo para ayudar a evaluar el cumplimiento del criterio de exposición durante los ensayos. Poojary et al. (2006) utilizaron un programa de elementos finitos LS-DYNA para este mismo fin que consiguió predecir la deformación máxima permisible para cumplir el criterio de exposición, siendo ligeramente más exigente que el ensayo de laboratorio y permitiendo una importante reducción en el tiempo y coste del ensayo.

3.3.4.2. Los arcos de seguridad abatibles

Los arcos de seguridad, delanteros o traseros, suelen instalarse en tractores estrechos que se usan en viñas y frutales. Estos arcos son abatibles o extensibles para que el tractor pueda trabajar entre los árboles sin que el arco golpee las ramas o los frutos de los árboles. De esta forma se consigue que el arco de seguridad cumpla la función de protección del tractorista, en caso de vuelco, cuando el tractor circula por campo abierto y esté con el arco de seguridad operativo (levantado o extendido) y, a la vez, permite el trabajo del tractor entre los árboles con el arco no operativo (abatido o encogido), trabajando en unas condiciones, entre los árboles, en que el peligro de vuelco es bastante reducido. El trabajo del tractor en algunas instalaciones ganaderas también puede ser dificultado por la altura del arco de seguridad (Etherton et al., 2004). Sin embargo, en tractores hortícolas y viñeros esta flexibilidad de los arcos de seguridad puede convertirse en un riesgo cuando el operario no vuelve a colocar el arco en la posición operativa o lo hace de forma incorrecta.

La consecución del doble objetivo de seguridad y operatividad del tractor entre los árboles, obliga a que el tractorista levante o abata el arco cada vez que sale o entra de entre los árboles. Esta obligación hace que esta solución sea inviable porque este cambio de posición del arco se debería hacer cada vez que el tractor entra y sale de una línea de árboles, lo que puede ocurrir cada pocos minutos y además dicha operación implica abandonar el puesto de conducción, retirar los pasadores de seguridad de uno de los lados del arco, dar la vuelta al tractor, retirar los pasadores de seguridad del otro lado, levantar o abatir el arco, colocar los pasadores de uno de los lados, dar la vuelta al tractor, colocar los pasadores del otro lado y ocupar de nuevo el puesto de conducción, lo que representa una gran cantidad de tiempo comparado con el transcurrido entre dos operaciones de levantado-abatido.

Se podría reducir el número de veces que se realiza la operación, omitiéndola entre línea y línea pero, en ocasiones, para salir de la línea hay que subir a un camino elevado o salvar un ribazo lo que es un factor de riesgo de vuelco. También se podría realizar la operación al cambiar de labor pero, en este caso, se reduce mucho la seguridad, sobre todo en el caso de trabajo en terrazas de frutales, con gran riesgo de vuelco y en el caso de parcelas dispersas en que son necesarios desplazamientos en los

que puede haber alto riesgo de vuelco. Además, la elevación y abatimiento del arco supone la exposición a sobreesfuerzos, a posturas forzadas y al riesgo de caída del arco durante las operaciones de abatimiento o levantado de éste. Groothuis et al. (2009) señalaron que este inconveniente hace que, a menudo, los arcos permanezcan en su posición inferior lo que constituye un riesgo mortal para los tractoristas. En el caso de tractores con el arco de seguridad atrasado hay que añadir la dificultad propia del acceso a la zona, en especial en función del tipo de apero que pueda llevar instalado en ese momento. Villanueva (2011), concluye que la tarea de levantar el arco de seguridad de tres modelos de tractor John Deere (5095M, 6025 y 85F) puede generar trastornos músculo-esqueléticos, principalmente en la zona dorso-lumbar porque exige la aplicación de una fuerza superior a la definida en la norma UNE-EN 1005-3 y que este riesgo de lesión es todavía mayor cuando se debe realizar desde una zona, como la de enganche de los aperos, en que el tractorista está desestabilizado.

De cualquier forma, lo que realmente hace que la solución del arco abatible no consiga la necesaria protección del tractorista, en caso de vuelco, es la propia naturaleza humana que hace que el tractorista vea como mucho más real la posibilidad, en la mayoría de los casos muy improbable, de golpear y perder un fruto, que la posibilidad de perder la vida en un vuelco. Cualquier técnico en prevención y cualquier observador sabe perfectamente que, en la práctica, los arcos de seguridad permanecen abatidos la mayor parte del tiempo y que son muy pocas las ocasiones en las que son levantados. Es bastante común que los arcos de seguridad no se levanten nunca y, en ocasiones, carecen hasta de los bulones necesarios para mantenerlos en la posición operativa.

Powers et al. (2000) publicaron que la mayoría de las lesiones y las muertes por vuelco de tractores estrecho se deben al mal uso de la ROPS de altura ajustable. En un estudio, realizado en 2008, en la Región de Murcia por Bafallui y Morente sobre 21 accidentes ocurridos entre 2005 y 2007, se comprobó que sólo en ocho casos el tractor tenía arco de seguridad y tan sólo en uno de ellos el arco estaba en posición operativa. Además, en este caso, el arco que estaba en posición operativa era artesanal y no estaba homologado. También se comprobó que de estos 21 accidentes, 14 fueron mortales y de estos vuelcos mortales, el 38% era de tractores equipados con arcos de seguridad y que en uno solo de esos vuelcos el arco estaba en su posición operativa.

En un estudio de la Estación de Mecánica Agrícola sobre vuelcos de tractor se puede comprobar que en siete de los ocho accidentes mortales evaluados, el arco de seguridad no estaba en la posición operativa sólo en uno estaba en la posición segura y, en este caso, la muerte se produjo porque el tractorista fue despedido fuera del asiento y aplastado por el tractor (Langle, 2012). Este mismo estudio indica que en tres de ocho accidentes sin resultado mortal el arco no estaba en la posición segura. En el año 2004. Un estudio del Cemagref (Francia) realizó una encuesta sobre las razones por las que los tractoristas no recolocaban los arcos de seguridad en la posición operativa resultando que en un 36% se debía al esfuerzo que exige el cambio de posición del arco, un 20% en la percepción de un bajo riesgo de vuelco y un 23% en la necesidad de tener que pasar por huertos.

Silleli et al. (2007) diseñaron un mecanismo, que denominaron de anclaje, para incrementar la zona que permanece segura durante el vuelco lateral de tractores estrechos. La instalación de este mecanismo puede permitir reducir la altura de los arcos de seguridad. El dispositivo consta de dos barras desplazables, en caso de vuelco, que se bloquean en la posición más ancha del sistema. Estas barras están dimensionadas para soportar el peso del tractor, en caso de vuelco. La mayor anchura de la estructura reduce la probabilidad de que el bonete impacte con el suelo, durante el vuelco, y aumenta la seguridad del tractorista. Silleli (2006) usó un programa ADAMS de simulación para evaluar la efectividad de este dispositivo para el tractor en el que se ensayó. Pudo demostrar que respecto al primer ensayo previo, en el que se comprueba la imposibilidad de rodadura continua del tractor, la altura de la ROPS podía reducirse hasta 495 mm por medio de este mecanismo de anclaje.

El desplazamiento de las barras se produce cuando un sensor detecta una inclinación del tractor que pone en peligro su estabilidad. En caso de peligro de vuelco, un detonador pirotécnico y unas reacciones químicas provocan el desplazamiento de las barras hasta bloquearse en la posición más ancha de la barra superior y todo antes de que el arco impacte con el suelo. Estos autores concluyeron que el mecanismo agrandaba la zona segura y reducía la superficie de contacto del tractor con el suelo y el tiempo del vuelco. También comprobaron que el tiempo necesario para el funcionamiento del dispositivo fue de 160 ms, frente a los 640 ms que duró el vuelco y se redujo el ángulo de rotación alrededor del eje horizontal.

Para determinar la resistencia del dispositivo, realizaron un ensayo estático lateral y un ensayo de vuelco lateral real (Silleli et al. 2008). Los resultados de un ensayo estático fueron verificados usando un programa ANSYS. Los citados autores concluyeron que, aunque debido a su novedad el dispositivo no puede ser ensayado según los actuales códigos, las tensiones generadas en los bulones podían ser determinadas y que después del ensayo, no hubo roturas en el dispositivo, ni en la ROPS, ni en las uniones y bulones de cierre que unen el dispositivo a la ROPS. También se pudo comprobar que el dispositivo aumentó la zona segura, considerando un plano simulado del suelo. En el ensayo de vuelco real, estos investigadores comprobaron que, aunque el dispositivo se dobló, no hubo invasión de la zona de seguridad.

3.3.4.3. La asistencia a la puesta en posición operativa de los arcos de seguridad abatibles.

Los esfuerzos necesarios para hacer pasar el arco de seguridad desde su posición de máximo despeje o inferior a su posición superior u operativa y el riesgo para la salud que puede suponer la frecuente realización de esta operación han llevado al desarrollo de diversos sistemas de asistencia a esta operación.

Langle (2012) estableció tres niveles de asistencia al paso de la posición de máximo despeje a la posición operativa. El nivel I sería la puesta del arco en posición operativa por el tractorista con o sin ayuda mecánica o utilizando una fuente de energía que proviene del propio tractor pero en la que la decisión del cambio de posición la toma el tractorista.

El segundo nivel sería un cambio automático a la posición operativa que se produce en situaciones de riesgo de vuelco sin la intervención del tractorista. El nivel III sería un desplazamiento instantáneo y automático del arco de seguridad hasta su posición operativa que se produce sin la intervención del tractorista y en un tiempo inferior al que dura el propio vuelco.

En el nivel I se pueden incluir diversos arcos de seguridad que se pliegan hacia atrás y que pueden ser montadas en tractores pre-ROPS, como la de la figura 16. Estas estructuras solo son seguras en posición superior.

Estos arcos se pueden levantar sin ayuda (figura 17) o bien con ayuda de palancas (figura 18).



Figura 16.- Arco abatible trasero



Figura 17.- Elevación manual directa de arco abatible



Figura 18.- Elevación de arco abatible con ayuda de palanca

En la figura 19 se puede ver el arco plegable diseñado por (Etherton et al., 2004) para ser acoplado en los semiejes traseros de los tractores.



Figura 19.- Arco de seguridad plegable acoplable a la trompeta del tractor (Etherton et al.)

También correspondería a este nivel el dispositivo inventado por Sheehan (1992) desarrolló un arco trasero de seguridad para tractores formado por dos elementos, el primero fijo al bastidor del tractor y el segundo montado introducido en el primero de forma que pueda desplazarse telescópicamente. El elemento móvil tiene forma de arco con sus barras introducidas en el primer elemento y el accionamiento para pasar de la posición inferior a la superior se realiza por medio de un resorte de contrapeso.

El dispositivo incluía un mecanismo de bloqueo para impedir el movimiento del mismo cuando el mecanismo de bloqueo está activado. El sistema de contrapeso incluye un muelle de compresión montado concéntricamente sobre la barra telescópica alojada que se introduce en las barras huecas del elemento fijo. De la misma forma, se incluirían en este nivel los arcos traseros de seguridad en los que el cambio de posición se realiza con la ayuda de un cilindro accionado por la presión de un gas, como el de la figura 20, y los arcos delanteros que se abaten y levantan manualmente o con algún tipo de ayuda mecánica.

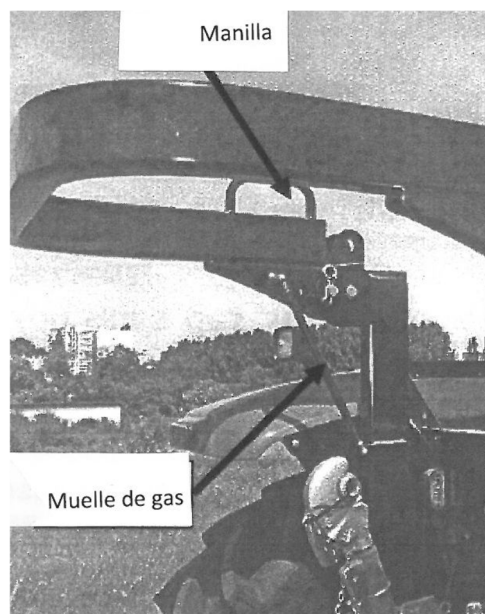


Figura 20.- Arco trasero con levantamiento asistido por ayuda mecánica

Groothuis et al. (2009) desarrollaron un prototipo de arco trasero de seguridad que utiliza un motoreductor eléctrico, alimentado por la batería del tractor, para elevar el arco plegable hasta su posición operativa y para bajarlo hasta la posición de máxima altura libre. La elevación consume un tiempo de menos de 10 segundos aunque que es superior al del vuelco por lo que este sistema proporcionaría un nivel II de apoyo. En la figura 21 se puede ver el motoreductor y en la figura 21 se puede ver el equipo, instalado en un tractor.

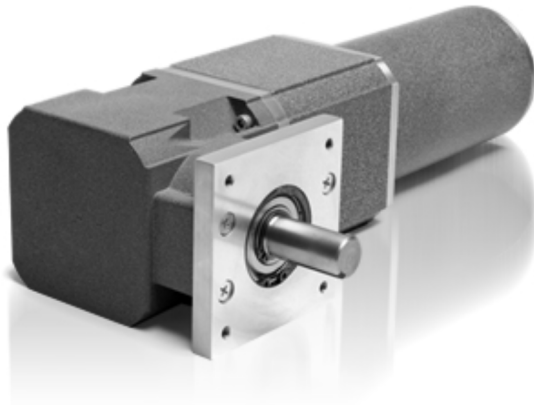


Figura 21.- Motoreductor usado por Groothuis et al.



Figura 22.- Equipo instalado en un tractor

Otra solución es la instalación de arcos de seguridad deslizantes como el presentado por Kubota en la Feria de la Maquinaria Agrícola de París (SIMA 2009). Esta solución se instala de serie, en el tractor Kubota M9540 LowProfile. El sistema consiste en un arco de seguridad retráctil.

La parte superior del arco está, en posición operativa, bloqueada por dos bulones en su posición superior pero, si se liberan estos bulones, penetra en la parte inferior /telescópica) de forma que se reduce la altura del arco y el tractor puede trabajar en condiciones de reducida altura libre. Un cilindro accionado por la presión de un gas ayuda a recolocar el arco en su posición operativa (figura 23)



Figura 23.- Sistema de cambio de posición del arco trasero del Kubota M9540 LowProfile

En este nivel II se puede incluir la solución constructiva presentada por la empresa Construcciones Mecánicas D'Eusanio, consistente en un dispositivo automático de antiplastamiento para máquinas agrícolas. El dispositivo eleva automáticamente, en situación de riesgo de vuelco, hasta la posición operativa, aunque no es lo suficientemente rápido para considerar que proporciona un nivel III de asistencia. Este dispositivo fue presentado, en 2008, en la Feria EIMA.

En el tercer nivel se encuentran los llamados arcos de seguridad automontantes o AutoROPS.

3.3.4.4. Los arcos de seguridad automontantes

D. Manuel Rosales Touza diseñó en el año 2001 un arco de seguridad delantero automontante que fue construido por Comercial VAZPE S.L. en Pontevedra y presentado en la Feria de Maquinaria Agrícola Semana Verde de Galicia, actual CIMAG, donde recibió una Mención especial del Jurado. El dispositivo, que no llegó a ser patentado, incluye un arco de seguridad delantero abatible que queda fijo en su posición inferior por dos muelles fuertemente comprimidos y bloqueados por dos bulones. El dispositivo se completa con un inclinómetro, dos detonadores pirotécnicos y dos bloqueadores. En caso de que el tractor supere una inclinación, prefijada como crítica, el inclinómetro activa los detonadores que expulsan los bulones. Los muelles quedan libres y se extienden rápidamente elevando el arco hasta la posición vertical donde quedan bloqueados por unos trinquetes.

Powers et al. (2000), miembros de la División de Investigación de Seguridad del Instituto Nacional de Seguridad y Salud Laboral de Estados Unidos, desarrollaron una ROPS desplazable automáticamente, a la que llamaron NIOSH AutoROPS. Esta ROPS está compuesta de dos sistemas, el primero, es una estructura desplazable que en posición normal de trabajo diario está bloqueada en su posición más baja y un segundo sistema que es un sensor que controla el ángulo de inclinación del tractor. En el momento en que el sensor detecta un ángulo de inclinación que puede llevar al vuelco del tractor, la estructura, bloqueada en su posición inferior, se desplazará y se bloqueará en la posición más alta antes de entrar en contacto con el suelo.

Esta AutoROPS no necesita ninguna acción para desplazarse porque cuando es desbloqueada es la acción de unos muelles, siempre comprimidos, la que la impulsa hacia arriba. Sobre esta estructura realizaron los ensayos correspondientes a la norma de ensayo SAE J2194 que son equivalentes a los contemplados en el Código 4 y también se cronometró el tiempo de desplazamiento del mecanismo. En la figura 24 se puede ver el sistema de muelles que impulsa hacia arriba la parte desplazable de la estructura, en caso de vuelco.

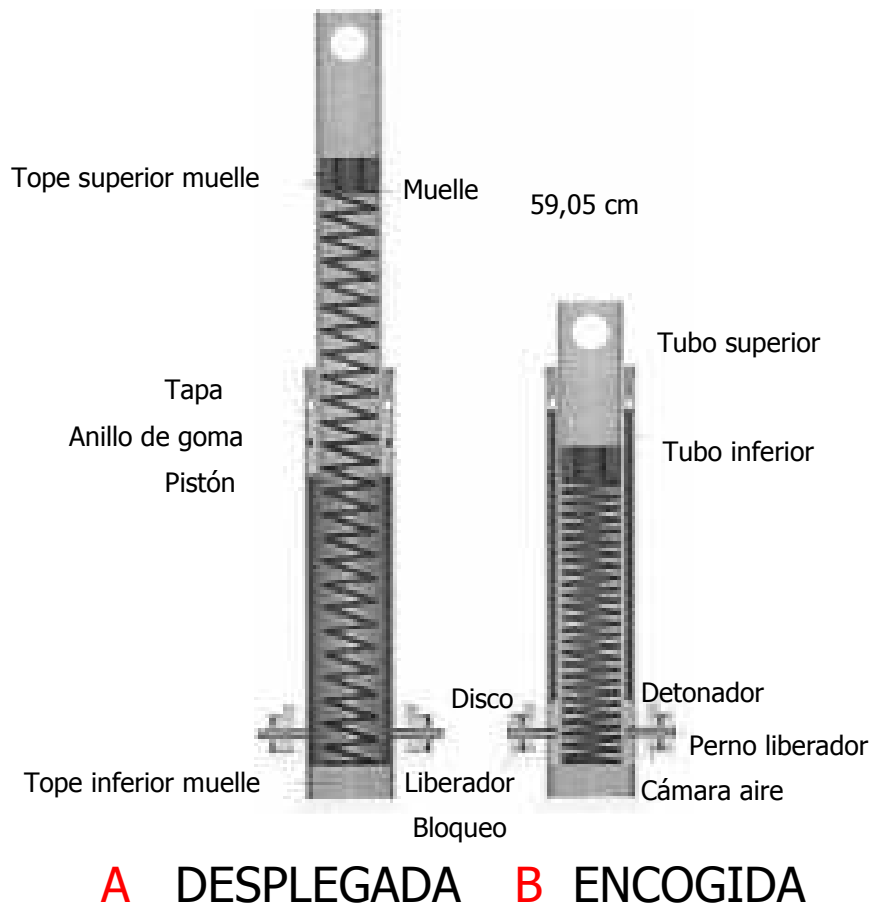


Figura 24.- Estructura y mecánicos de la AutoROPS

La estructura de la AutoROPS, construida por estos investigadores está constituida por dos tubos telescópicos y la extensión del sistema es producida por la acción de un muelle. La altura de la estructura en su posición no operativa fue determinada por la altura de los hombros de una persona normal, con el objetivo de que los tractoristas puedan ver por encima de la barra horizontal de la AutoROPS, en posición encogida. La altura de desplazamiento elegida fue de 59,09 cm con el objetivo de obtener una altura, en posición extendida, similar a la de un arco de seguridad comercial. El paso de la posición extendida a la encogida se realiza mediante dos cilindros de doble efecto accionados desde el puesto de conducción (Powers et al., 2001).

Eligieron un tiempo de desplazamiento de 0,3 segundos porque este es el criterio elegido para la protección al vuelco de automóviles descapotables (por ejemplo el Mercedes Spyder). Es un tiempo sensiblemente inferior a los 0,75 segundos que Hathaway y Kuhar (1994) indicaron que tarda un tractor en un vuelco trasero desde el

punto de no retorno al contacto con el suelo, estimación corroborada por Silleli et al. (2008) que, a partir de unas imágenes de video, demostraron que el tiempo total del vuelco del tractor equipado con su dispositivo de anclaje fue de 0,72 segundos. La fuerza necesaria para elevar la estructura la realizan los muelles que empujan los tubos interiores y la liberación de estos tubos se consigue por unos detonadores que desenganchan, simultáneamente dos pernos que bloquean la estructura en la posición interior.

Cada perno es impulsado hacia afuera por la presión del gas que actúa en la cámara de expansión. Una corriente de 1,2 A durante 2 milisegundos produce la expansión de 10 cm³ de gas pirotécnico que produce una presión de 5,5 bares. Al soltarse los pernos, se liberan los pistones, y los muelles que están comprimidos, elevan rápidamente la estructura hasta su posición desplegada. Otros dos pasadores por pistón bloquean la estructura cuando llega a su posición superior. Estos muelles deben ser lo suficientemente seguros y resistentes para absorber las cargas que van a recibir, durante el vuelco. Un anillo de goma absorbe la energía liberada en la extensión de la AutoROPS.

El sensor que controla las pequeñas explosiones que producen la extensión de la estructura se diseñó para que no dependiera del centro de gravedad porque éste varía cuando se enganchan los distintos aperos. Está formado por tres acelerómetros dispuestos sobre los tres ejes cardinales, un microcontrolador con un algoritmo que controla las señales recibidas y determina si el tractor está en condiciones seguras y, en caso contrario, manda una señal electrónica al sistema de disparo que libera las espigas que retienen los cilindros y la AutoROPS se despliega.

Esta estructura fue ensayada con éxito de acuerdo a la Norma SAE J2194, similar a los códigos de ensayo de la OCDE y también fue sometida a ensayos de vuelco real, trasero y lateral, en los que la estructura mantuvo una zona de supervivencia lo suficientemente extensa para que la vida del tractorista fuese protegida suficientemente.

McKenzie y Etherton (2002) discutieron el diseño de la segunda generación de sensores de cierre y liberación (LRM, acrónimo inglés de latch and reléase mechanism) que controlan el ángulo de inclinación del tractor en sus dos ejes. En la figura 25 se muestra esta estructura de protección al vuelco autoextensible.



Figura 25.- AutoROPS en posiciones retraída y desplegada (Etherton et al., 2004)

Etherton et al. (2004) estudiaron la aceptabilidad de este prototipo de AutoROPS mediante una encuesta sobre 32 agricultores y pudieron concluir que estos agricultores opinaron que la AutoROPS es más efectiva que la estructura de despliegue manual y que estaban más interesados en montar, en sus tractores, esta estructura automática que la manual. McKenzie et al. (2005) construyeron un prototipo de AutoROPS que fue ensayado, con éxito en el laboratorio, conforme a lo dispuesto en la norma SAE J2194, similar a los códigos de ensayo de la CE.

Rohner et al. (2010) desarrollaron un arco trasero de seguridad automontante para vehículos a motor que dispone de un elemento móvil, fijado en la posición inferior por un dispositivo de bloqueo. En caso de vuelco, el elemento móvil es liberado por un dispositivo pirotécnico comandado por unos sensores y se despliega impulsado por la presión de gas hasta la posición en que proporciona la seguridad necesaria y en la que

queda bloqueado por medio de un dispositivo de bloqueo. El dispositivo de protección fue diseñado de tal forma que con la menor carga pirotécnica posible el elemento móvil adquiere una gran energía cinética a los pocos milímetros de despliegue. Estos autores consideraron que la fuerza de sujeción entre el elemento fijo y el liberable debía oscilar entre un mínimo de 300 N y un máximo de 5000 N.

Aunque no existe una norma establecida para AD-ROPS para tractores estrechos, ANSI/ASABE aprobó en noviembre de 2010 una norma que establece los requisitos de funcionamiento de una estructura de protección desplegable automáticamente para cortacéspedes, que obliga a diseñar las AD-ROPS de forma que se consiga minimizar los riesgos asociados a la implementación, y a que el tiempo de despliegue sea lo suficientemente corto para evitar que la máquina complete el vuelco en cualquier dirección antes de completar su despliegue y bloqueo en la posición operativa y a no invadir la zona de seguridad durante la implementación y cumplir con otros requisitos.

Alkhaledi et al. (2013) probaron un prototipo del AD-ROPS de NIOSH de tercera generación y concluyeron que cumplía de forma satisfactoria los requisitos de la norma SAE J2194. Concluyeron que el éxito de los ensayos de los AutoROPS NIOSH diseñados permiten su desarrollo industrializable acuerdo a la norma ANSI/ASABE S599.

3.4. Los cinturones de seguridad

Como ha quedado demostrado, la medida más efectiva para reducir las consecuencias de los vuelcos es la instalación en los tractores, de ROPS que protejan efectivamente una zona segura. Por lo tanto, las ROPS protegen una determinada zona y para que el tractorista esté suficientemente protegido es necesario que permanezca, durante todo el vuelco dentro de la zona protegida. Esto hace necesaria la instalación de un cinturón de seguridad que asegure que, en caso de accidente, el tractorista se mantenga dentro de esa zona de seguridad que debe ocupar durante el vuelco y no salga despedido. El conjunto de una ROPS y un cinturón de seguridad es el equipo que proporciona al tractorista la mayor seguridad posible, en caso de vuelco.

El objetivo de un cinturón de seguridad de un tractor, debe ser asegurar una adecuada fijación del conductor que le mantenga dentro de la zona de seguridad, definida para cada caso, durante el vuelco o durante cualquier otro accidente. La seguridad que proporciona un determinado cinturón de seguridad viene determinada por su capacidad de ayudar a retener al tractorista, durante un vuelco, dentro de la zona protegida por la ROPS.

El cinturón de seguridad está formado por una cinta de sujeción, una hebilla, un regulador de longitud, un recogedor y un sistema para fijarlo al anclaje. Debe asegurar la retención del tractorista en caso de accidente o vuelco, pero permitiendo al tractorista una cierta movilidad para que pueda desarrollar adecuadamente su trabajo (Mangado, 2006).

Es importante considerar que el cinturón de seguridad es absolutamente necesario, en caso de vuelco, en los tractores con ROPS debidamente homologadas, pero no en los que carecen de ellas, ya que en estos tractores no deberían instalarse cinturones porque, en caso de vuelco, el tractorista no tendría la posibilidad de salir del mismo siendo aplastado (Kelsey et al., 1996). Estos mismos autores realizaron una encuesta sobre 201 agricultores comprobando que el 26,4% de los tractores tenían cinturón de seguridad pero los operarios sólo lo utilizaban el 31,8% del tiempo de trabajo.

La cantidad de movimiento que debe eliminar el cinturón de seguridad de un tractor, en el momento del accidente, es directamente proporcional a la masa del tractorista y a la velocidad del tractor, de mucha menor magnitud que la de los automóviles. Por esta razón, las características del mismo deben ser diferentes a las de los utilizados en automoción porque la principal función del cinturón será mantener al tractorista dentro de la zona de seguridad durante un vuelco, en lugar de asegurar que el tractorista no golpea el parabrisas durante un choque frontal, como ocurre en los automóviles. La escasa velocidad del tractor puede provocar que el cinturón no se bloquee automáticamente durante un vuelco o un accidente.

3.4.1. Tipos de cinturones de seguridad

Existen distintos tipos de cinturones como son los que habitualmente se emplean en los automóviles, los de un asiento de protección de niños, y los de los aviones. Los cinturones de seguridad de los automóviles son autobloqueantes, de forma que el ocupante puede moverse despacio con comodidad, pero en el momento de un choque la gran fuerza de inercia que le comunica su gran velocidad bloquea el cinturón que le sujeta firmemente al asiento. Sin embargo, el tractor es un vehículo que circula a escasa velocidad y el vuelco de un tractor también es bastante lento, por lo que no se puede asegurar, en ninguna de las dos ocasiones, que el cinturón se bloquee automáticamente.

3.4.1.1. Cinturones de dos puntos

Son los que suelen instalarse en los asientos de los tractores y pueden ser con o sin pretensor. El pretensor del cinturón de seguridad es un dispositivo que compensa el alargamiento inevitable de los cinturones bajo la acción del cuerpo. Los pretensores pueden tener bloqueo automático (figura 26) o de emergencia (figura 27). En el primer caso cuando el operario se pone el cinturón, este se bloquea automáticamente ajustándose a su cuerpo. El pretensor de emergencia también se ajusta al operario pero con la diferencia de que no se bloquea hasta que se ejerce una aceleración determinada, siendo este método el empleado en los automóviles.



Figura 26.- Pretensor de bloqueo automático



Figura 27.- Pretensor de bloqueo de emergencia (horizontal y vertical)

Los cinturones con pretensor pueden tener recogedor y bloqueo automáticos. Su regulación se realiza de modo sencillo y cómodo: existe un sistema que libera o bloquea el cinturón, extrayendo el cinturón en una longitud superior a la necesaria, el conductor adopta su posición de trabajo y una vez que ha adoptado esa posición, el cinturón se retrae automáticamente hasta alcanzar la posición del operario tal y como pasa en los cinturones de los automóviles. También puede incorporar un dispositivo antiestrangulación que permite al cinturón, una vez abrochado, bloquearse en posición adherida al trabajador.

Para evitar que en presencia de movimientos oscilantes del trabajador (debidas por ejemplo a las vibraciones del tractor) el cinturón tienda a apretarse, el mecanismo de bloqueo automático se embraga cada 30 mm de recorrido del cinturón. Después de un movimiento hacia atrás del usuario, el cinturón sigue a este último en su movimiento oscilante con un margen de 30 mm (Cianotti, 2008).

El sistema de cinturones sin pretensor es el más utilizado en las gamas básicas. Los cinturones pueden ser anclados al asiento que no disponen de ningún sistema mecánico ni electrónico en lo que el operario se abrocha manualmente el cinturón, ajustándolo correctamente a la zona pélvica o de dos puntos de lazo, sujeto mediante una cinta que pasa por un punto rígido del asiento, para después coser las dos cintas formando un lazo. Estos cinturones pueden ser estáticos regulables, como los utilizados en los autobuses, en los que el tractorista abrocha y ajusta manualmente el cinturón o de ballesta, más cómodo y que reduce el riesgo de heridas por ser más ancho y acolchado. En la figura 28 se puede ver que la mitad del cinturón es ajustable y la otra mitad semirígida.

El sistema de tensado del cinturón está al alcance de la mano y normalmente se encuentra sobre el lado izquierdo del asiento. El cinturón es sumamente visible y no puede ser apartado por su rigidez. Gracias a esta característica el operario deberá abrocharse el cinturón siempre que utilice el tractor, favoreciendo la seguridad del mismo.



Figura 28.- Cinturón tipo ballesta

En los cinturones de dos puntos los anclajes más comunes, como se muestra en la figura 29, son: de correas, metal, tipo cable, tipo polaina y lazo. Dentro de estos anclajes existen otros modelos parecidos con pequeñas variaciones en el diseño.

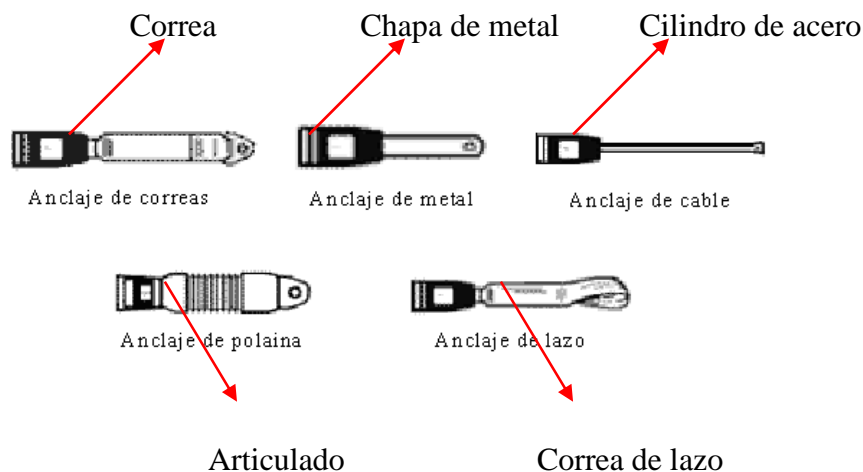


Figura 29.- Principales anclajes en los cinturones de dos puntos

Huaier et al. (2008) concluyeron que los cinturones de dos puntos pueden ser un sistema de sujeción peligrosa, ya que pueden causar daños abdominales por el efecto denominado “*efecto cuchillo*”, así como incrementar la acción bisagra a nivel de la cadera, favoreciendo las lesiones de columna vertebral por hiperflexión.

Este efecto suele darse en colisiones a velocidades relativamente altas por lo que es más difícil que ocurra en tractores. Este tipo de cinturón de seguridad se coloca sobre las caderas del pasajero, esto es, contra la pelvis y no contra el abdomen blando.

3.4.1.2. Cinturones de tres puntos

El cinturón de tres puntos, inventado por el ingeniero de Volvo, Nils Bohlin, es el que más vidas salva en vehículos de carretera y también se usa en tractores, con el mismo mecanismo y distinta sensibilidad del pretensor o bloqueo, siendo en los tractores considerablemente más sensible ya que a la hora del vuelco la aceleración del operario es mucho menor. Respecto a la colocación, la zona baja debe ir sobre la pelvis, no sobre el abdomen, mientras que la banda superior debe ir sobre el hombro.

Existen cinturones de tres puntos sin pretensor, con pretensor y con guía y pretensor como se muestra en la figura 30. Los bloqueos de los pretensores pueden ser automático o de emergencia.

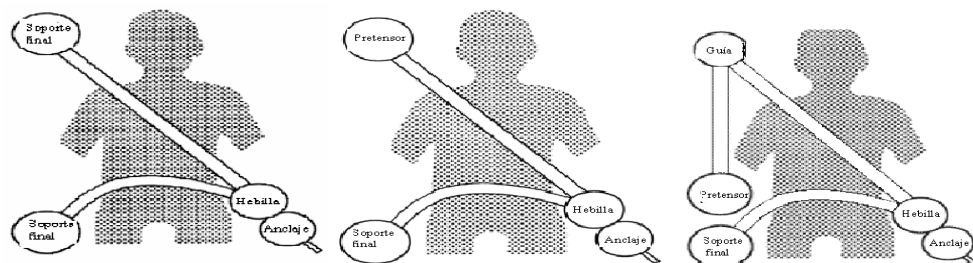


Figura 30.- Cinturón de tres puntos sin pretensor, con pretensor y con guía y pretensor

3.4.2. Incorporación del cinturón en tractores provistos de ROPS

En los tractores que disponen de asiento fijo o móvil preparado con puntos de anclaje para cinturón de seguridad, se debe montar el cinturón de seguridad siguiendo las indicaciones citadas en el manual de uso y mantenimiento del tractor si las hay, y de acuerdo con la información técnica proporcionada por el fabricante del cinturón. En el caso en que el asiento preparado con puntos de anclaje se instale en el tractor después de

la primera salida al mercado, hay que tener en cuenta también la información técnica proporcionada por el fabricante del asiento (Jarén et al., 2008). En los tractores con asiento móvil que no disponen de puntos de anclajes, es necesario proceder a la sustitución del asiento por otro dotado de puntos de anclaje para el cinturón de seguridad y adecuado para el tipo de tractor sobre el cual se va a instalar. En los que tienen asiento fijo, sin puntos de anclaje, se puede sustituir el asiento por otro con puntos de anclaje o anclar el cinturón a una parte fija del tractor que no forme parte de la ROPS.

Los puntos de anclaje deben estar colocados de forma que su posición no sufra modificaciones durante la deformación de la estructura de protección en caso de vuelco, estando siempre en el interior del área rayada dibujada en la figura 31. Los puntos de anclaje B1 y B2 deben encontrarse a una distancia horizontal del plano de simetría longitudinal del asiento mayor de 175 mm e inferior a 350 mm. El ángulo del cinturón respecto al plano horizontal debe ser el más cercano posible a 45°. El ángulo puede variar respecto a los 45°, no obstante en ningún caso el ángulo debe ser menor de 20° o mayor de 75°. El anclaje debe presentar un orificio roscado de 11,11 mm (7/16) 20 UNF 2B

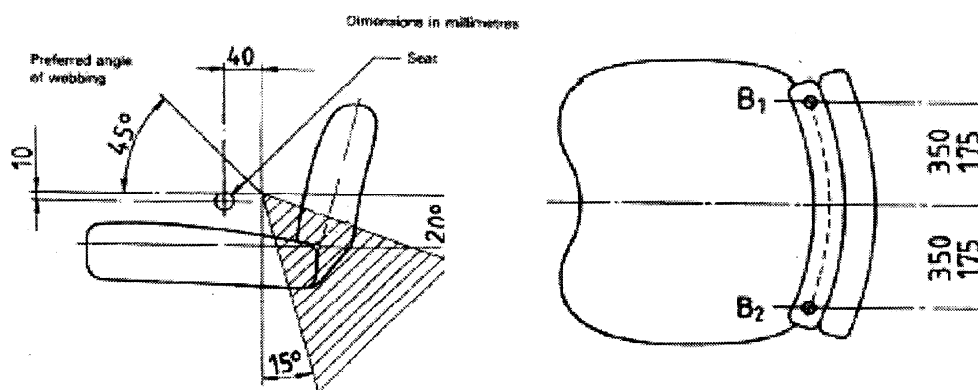


Figura 31.- Posición de los puntos de anclaje del cinturón de seguridad

3.4.3. Normas aplicables a los cinturones de seguridad

Las normas que regulan las prestaciones que deben cumplir los cinturones de seguridad se refieren a las cargas que deben soportar los asientos y sus componentes y, en algunos casos, las deformaciones máximas que pueden producirse bajo estas cargas, pero nada dicen de la capacidad que deben tener los cinturones para mantener al tractorista dentro de la zona de seguridad durante el vuelco del tractor. Entre dichas normas está la SAE J2194 que es una de las utilizadas para definir las prestaciones de las ROPS. En ella se fija en 4.448 N, más el cuádruple del peso de todos los componentes del asiento, la carga delantera que debe soportar el asiento y sus componentes, aplicado al anclaje.

En cuanto a la carga trasera que tiene que soportar, ésta es de 2.224 N más el doble del peso de todos los componentes del asiento. Por otra parte, la norma ISO 3776 determina que esta carga debe ser de 4.500 N, con una deformación límite del anclaje del cinturón de seguridad de 100 mm en cualquier dirección. La Directiva 76/115/CEE, aplicable a los vehículos a motor con una velocidad de 25 km/h, determina que la carga que tiene que soportar el asiento y sus componentes es de $22.250 \pm 200\text{N}$. En otras ocasiones se ha considerado que las condiciones de tensión a que está sujeto el cinturón de seguridad durante el vuelco de los tractores son asimilables a los de una máquina móvil no vial, y a los de las máquinas para el movimiento de tierras y se han utilizado las normas SAE J386 e ISO 6683. De cualquier forma, el cinturón de seguridad debe ser declarado idóneo por el fabricante del cinturón y debe montarse sobre tractores agrícolas o forestales.

En el apartado 6.2 del documento de trabajo presentado en la reunión técnica de trabajo celebrada los días 2 y 3 de junio de 2009 en Madrid (TAD/CA/T/A(2009)2), los expertos, representantes de la Administración de Turquía, presentaron las exigencias de las diferentes normas de ensayo de cinturones, que quedan recogidas en la tabla 2.

Norma	Ángulo de tracción	Fuerza (N)		
		Hacia adelante	Hacia atrás	
OECD Code 3, 4, 6, 8, 9	450 ± 20	4.450 + 4 Fg	2.225 + 2 Fg	
SAE J2194	450	4.448 + 4 Fg	2.224 + 2 Fg	
ISO 6683	600 ± 150	15.000	---	
ISO 3766	450 ± 20	4.500	---	
SAE J386	600 ± 150	Asientos de menos de 70 kg	15.000	---
		Asientos de más de 70 kg	15.000 + 10 Fg	
76/115/EC	100 ± 50	M ₁ ve N ₁ class	22.250 ± 200	---
		M ₂ ve N ₂ class	11.100 ± 200	---
		M ₃ ve N ₃ class	7.400 ± 200	---

Tabla 2.- Exigencias de las normas internacionales para ensayo de los cinturones de seguridad y sus anclajes

Molari y Rondelli (2007) evaluaron la resistencia de los anclajes de los cinturones de seguridad en los tractores agrícolas para valorar la idoneidad de las normas SAE J2194, ISO3776 y la Directiva 76/115/CEE que definen la forma de ensayar los cinturones de seguridad.

Es destacable señalar que existen diferencias significativas entre estas normativas, en cuanto al análisis de las fuerzas de anclaje del cinturón de seguridad, pues mientras las normas SAE J2194 e ISO 3766 consideran unas fuerzas de (4.448 + 4Fg) N y 4500 N, respectivamente, la directiva CEE considera una fuerza de (22.250 ± 200) N, que es muy superior. Estos autores determinaron la fuerza a la que podrían ser sometidos los anclajes de los cinturones de seguridad, con el fin de verificar si el nivel de carga prevista por la Directiva 76/115/CEE es aceptable para los distintos tipos de anclajes actualmente instalados en los tractores agrícolas. Concluyeron que la carga prevista por la citada directiva es excesiva y que las definidas en las dos normas citadas están mucho más cerca de la resistencia exigible a los cinturones de seguridad.

Este resultado concuerda con el obtenido por los investigadores de la Universidad Pública de Navarra en ensayos realizados con un simulador de vuelco, sobre distintos modelos de asientos equipados con cinturones de seguridad.

Estos autores calcularon las fuerzas de anclaje mediante la fórmula:

$$FC = (MC + MS) * a = 110 * 20 \text{ kgm/s}^2 = 2.200 \text{ N}$$

donde FC es la fuerza que actúa en el anclaje del asiento, supuesto anclaje del cinturón de seguridad, MC es la masa del conductor 75 kg y MS es la masa del asiento del conductor 35 kg, siendo “a” la aceleración en m/s^2 .

3.4.4. Evaluación de los cinturones de seguridad

Se han realizado pocas investigaciones respecto a las prestaciones que deben tener los cinturones de seguridad, cuál es el modelo ideal, cómo se deben colocar cinturones nuevos en tractores que no los tienen y demostrar las ventajas del uso conjunto del cinturón con la estructura de seguridad. Algunos investigadores han estudiado los niveles de seguridad que se obtienen usando diferentes cinturones. Así, por ejemplo, Rains (2000) estudió la efectividad de un sistema de pretensión de un cinturón de tres puntos de anclaje, equipado con carrete de bloqueo respecto a la de un cinturón que no posee este sistema, concluyendo que el sistema de pretensado ayudaba, en gran medida, al tractorista a permanecer dentro de la zona de seguridad durante un vuelco lateral del tractor. Silleli et al. (2009) presentaron en el documento TAD/CA/T/A(2009)2, los resultados de unos ensayos de asientos y cinturones de seguridad en los que se estudian tanto choques frontales como vuelcos de tractor. En todas estas investigaciones se utilizan simuladores de vuelco para la obtención de resultados rápidos y fiables.

3.5. Los sistemas de activación de las ROPS desplegables automáticamente (AD-ROPS)

La activación de las ROPS auto desplegables debe ser rápida porque la suma de los tiempos de activación, despliegue y bloqueo en la posición segura nunca puede superar el tiempo del vuelco. Powers et al. (2001) usaron un dispositivo, para activar el despliegue del NIOSH AutoROPS que incluía sensores, acelerómetros, un multiplexor, un microcontrolador y un circuito de disparo.

La activación debe producirse siempre que se produzca el vuelco y en ninguna otra situación. Es absolutamente imprescindible evitar que la ROPS no se despliegue, en caso de vuelco, evitar los falsos negativos, pero también es necesario evitar que la ROPS se despliegue sin que se produzca el vuelco, evitar los falsos positivos, porque pondría en peligro la integridad del tractorista. Existe una serie de circunstancias de mayor riesgo de activación accidental del sistema como pueden ser las operaciones de mantenimiento del tractor, la carga o descarga del mismo, los cambios de ruedas o las operaciones de rescate.

Cuanto más se retrasa el momento de activación del despliegue de la ROPS más fácil es evitar los falsos negativos porque la activación solo se produce cuando el vuelco es realmente inminente. Para retrasar el momento de la activación se incrementa el ángulo de inclinación del tractor, elegido para activar el despliegue de la ROPS, lo que requiere reducir el tiempo de despliegue y bloqueo de la ROPS. Powers et al. (2001) consiguieron desplegar y bloquear su NIOSH AutoROPS en tan solo 300 ms y este es el tiempo que tarda en desplegarse el arco seguridad trasero de un automóvil descapotable como el Spyder. Silleli et al. (2007) ensayaron un mecanismo de anclaje, que es un sistema que se despliega automáticamente, activado por sensores, aumentando la zona protegida por la ROPS, utilizando un tractor cuyo ángulo de inestabilidad era de 50,1°.

3.6. Simuladores de vuelco

Rains (2000) construyó un simulador de vuelco capaz de simular el vuelco lateral (figura 32). Estimó que el tractor podría describir, durante el vuelco, un ángulo de giro de hasta 180°, alcanzando una velocidad angular de $260^{\circ}\cdot s^{-1}$ ($1,44\pi\cdot s^{-1}$), produciendo una deformación de alrededor de 254 mm en la ROPS.

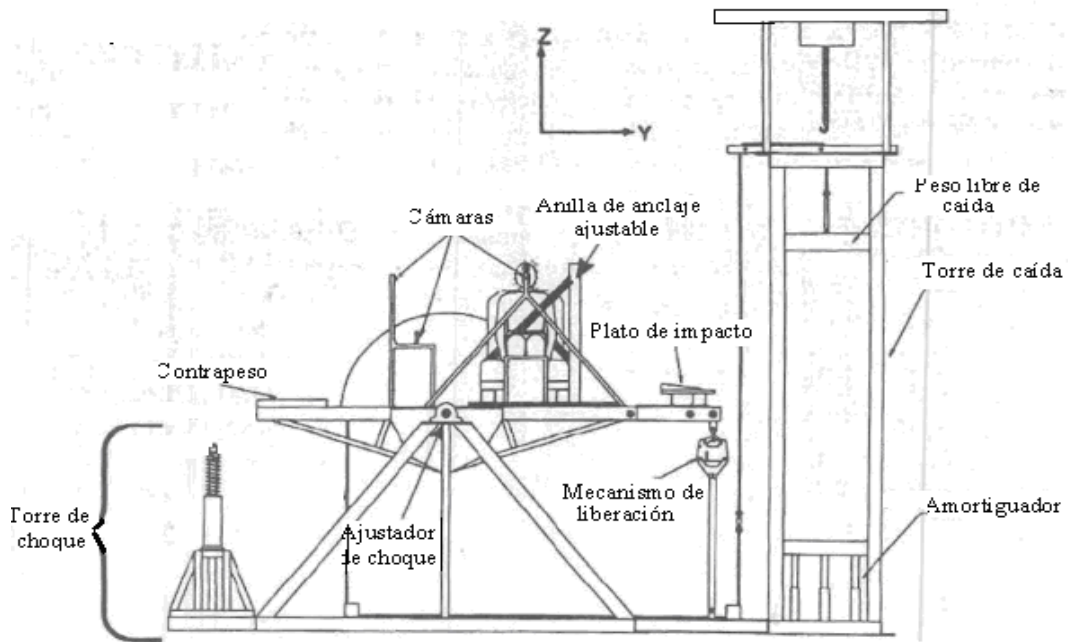


Figura 32.- Esquema de funcionamiento de la estructura de vuelco (Rains, 2000).

Para simular el vuelco, se suelta el peso libre de caída que compensaba la fuerza ejercida por el contrapeso. En este momento, se suelta la plataforma, que gira en torno al centro de rotación hasta que el plato de impacto golpea a la torre de choque.

En este simulador se puede regular la velocidad de giro, modificando la masa de caída libre, lo que supone reproducir vuelcos de diferente intensidad, y el grado de amortiguación del impacto contra el suelo, lo que reproduce impactos con suelos de distinta dureza, mediante la regulación del amortiguador de la torre de choque.

Sin embargo, este prototipo tiene como principales inconvenientes que no reproduce ninguno de los ejes reales de vuelco del tractor pues el único eje de vuelco está situado a la altura de los pies del tractorista, y el único ángulo de giro del vuelco, que se puede reproducir es de 180° cuando el ángulo de giro que produce la reacción del cinturón de seguridad es de 90° más la pendiente lateral del terreno donde vuelca el tractor.

Silleli et al. (2009) en el documento TAD/CA/T/A(2009)2, presentaron un simulador de vuelco, en el que se vuelca una plataforma que contiene al asiento anclado junto con su conductor (dummy) sujeto al cinturón de seguridad. El vuelco se realiza

respecto de un eje de giro situado debajo de conductor. Este dispositivo se muestra en la figura 33.



Figura 33.- Sistema de simulación de vuelco lateral. Prototipo turco.

Este simulador presenta importantes inconvenientes porque no reproduce ninguno de los ejes reales de vuelco del tractor: el único eje de vuelco está situado justo debajo del asiento; no puede simular vuelcos de diferente magnitud y no simula la amortiguación que realiza el terreno y la propia ROPS.

El equipo de investigación en Mecanización Agraria del Departamento de Proyectos e Ingeniería Rural de la Universidad Pública de Navarra desarrolló un prototipo de simulador al vuelco que se puede ver en la figura 34.



Figura 34.- Simulador de vuelco. Prototipo UPNA

Este simulador fue diseñado para la reproducir el movimiento del tractorista durante los distintos vuelcos laterales, pudiendo variar de asiento y de posición, simulando así el vuelco de tractores de diferentes envergaduras, con el objetivo de determinar el nivel de seguridad que proporcionan los diferentes asientos comerciales. El prototipo tiene como ventajas más importantes que reproduce el primer y segundo ejes reales de vuelco del tractor, reproduce un vuelco real de 90 grados y reproduce la amortiguación del terreno. Sin embargo tenía algunos inconvenientes como que es estructuralmente poco resistente y no puede variar la intensidad del vuelco, en la práctica.

Utilizando este prototipo, estos investigadores pudieron realizar una primera aproximación para evaluar la capacidad de retención del tractorista que proporcionan los distintos cinturones durante el vuelco y la resistencia que deben tener los propios cinturones, sus anclajes y los anclajes de los asientos al tractor. Sentaron las bases para establecer criterios de diseño que optimicen esta capacidad de retención y también las resistencias mínimas que deben tener los cinturones, sus anclajes y los anclajes de los asientos al tractor. De la misma forma, pudieron hacer una primera evaluación sobre la idoneidad de las normas que se están utilizando para los ensayos de los asientos y sus componentes.

Se evaluaron cuatro asientos, provistos de cinturón de seguridad, diferentes: el primero de dos puntos con pretensor de bloqueo de emergencia, el segundo de dos puntos con recogedor y sistema de bloqueo, el tercero y el cuarto de dos puntos y lazo manual, aunque el cuarto es de gama más alta que el tercero.

La aceleración sufrida por el tractorista, que determina los esfuerzos que deben resistir el cinturón, sus anclajes al asiento y los anclajes del asiento al tractor, se midió mediante un sensor Smart Spud que consta de cuatro acelerómetros triaxiales contenidos en un cilindro de plástico duro el cual se introduce en el lugar de medición del impacto, en nuestro caso el cinturón de seguridad. Las mediciones realizadas por el Smart Spud aparecen en la pantalla del ordenador manual en el mismo momento en que se producen y se representan por medio de histogramas. En la figura 35 se puede ver el sensor y el ordenador.



Figura 35.- Sensor Smart Spud y ordenador manual

El asiento se montó en el simulador y el dummy se sentó en el asiento, se sujetó con el cinturón de seguridad, al que se fijó el sensor Smart Spud, y se sujetaron las manos del dummy a una cuerda que une los perfiles verticales delanteros de la estructura de protección al vuelco para reproducir la sujeción que el tractorista realiza al volante.

El simulador se volcó de forma manual, empujando cuidadosa y lentamente la estructura hasta llegar al punto de no retorno y, a partir de ahí, se deja caer y volcar por la fuerza de la gravedad, girando sobre el primer eje de giro hasta que la parte del simulador que reproduce la parte superior de la rueda trasera del tractor impacta con el suelo y cambia el eje de giro, hasta que vuelve a cambiar cuando la estructura impacta con el suelo y hasta que el simulador se detiene. Durante el proceso la cámara de video grabó el movimiento del dummy sobre el que se han marcado unos puntos de referencia para ayudar a situarlo en todo momento respecto a la zona de seguridad del tractor. En el momento en que el tractor se detiene se tomaron fotografías de la posición en que ha quedado el dummy.

La evaluación de seguridad que proporcionan los cinturones se realizó comprobando la capacidad que tenía cada uno de ellos para mantener al dummy, durante el vuelco, dentro de la zona de seguridad. Durante el vuelco se produce una aceleración en el movimiento del tractorista respecto al tractor que provoca un desplazamiento del tractorista respecto al tractor. En el caso de no existir cinturón de seguridad, el tractorista tiende a salir de la zona de seguridad aumentando, en gran medida su riesgo, mientras que si el tractorista tiene abrochado su cinturón de seguridad, éste permite el movimiento relativo tractorista-tractor sólo durante un corto

espacio de tiempo y desplazamiento hasta que se bloquea y tensa. En este momento, se produce, por una parte, un desplazamiento del tractorista respecto al tractor, que depende de la forma en que el cinturón lo sujeta y que puede tener como consecuencia la salida del tractorista de la zona de seguridad y un esfuerzo que el tractorista realiza sobre el cinturón, que es proporcional a la masa del tractorista y que se traslada a los anclajes del cinturón y a los anclajes del asiento al tractor. Además, el asiento también realiza un esfuerzo sobre sus anclajes que es proporcional a su masa.

De esta forma, el tractorista puede salir de la zona de seguridad debido a la acumulación de tres efectos: su desplazamiento permitido antes del bloqueo y tensado del cinturón y el que sucede después de que el cinturón comience a sujetar al tractorista; la deformación que pueda producirse en la cinta del cinturón o en sus anclajes y la deformación que se pueda producir en el anclaje del asiento al tractor.

Estos investigadores comprobaron en el reducido número de ensayos que permitió la fragilidad de la estructura del prototipo, que todos los asientos evaluados fueron capaces de mantener al tractorista en el asiento, aunque no asegurasen la permanencia del mismo totalmente dentro de la zona de seguridad durante todo el vuelco. Por lo tanto, no parece que el tractorista pudiera salir despedido y ser aplastado por el tractor, aunque puede sufrir otras lesiones. También se pudo comprobar que la seguridad proporcionada por el cinturón de seguridad aumenta cuando sucinta corta a la línea horizontal perpendicular al eje longitudinal del tractor, que pasa por el punto de referencia del asiento, de forma que sujeta al tractorista por la zona pélvica en lugar de por las piernas. También se comprobó que tres de los cuatro modelos de asiento evaluados eran capaces de soportar el esfuerzo producido en el vuelco y en el cuarto deberían ser rediseñadas sus guías de anclaje al tractor, aumentando su resistencia.

Respecto a las aceleraciones sufridas por el tractorista durante el vuelco reproducido, se comprobó que no existían diferencias significativas entre las aceleraciones producidas con los distintos equipos ensayados. Los datos de aceleración pueden servir para verificar cuál de las normas SAE J2194, ISO 3776 y la Directiva 76/115/CEE se adecua más a la realidad. La desaceleración máxima previsible es de unos $8,5 \text{ g} * 9,816 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, lo que nos da un resultado de $83,44 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Multiplicando esta aceleración por una masa estimada del tractorista de 100 kg se obtiene una fuerza

previsible de 8.344 N que se aplicará en los dos anclajes del cinturón de seguridad. Por consiguiente, la tensión de la cinta será de 4.172 N y cada anclaje soporta una fuerza de 4.172 N. La fuerza calculada parece estar en consonancia con las cargas previstas por la norma ISO (4.500 N) y SAE (4.448 N) para los tractores agrícolas, mientras que es muy inferior a la considerada por la directiva CEE ($22.250 \pm 200\text{N}$).

Estos resultados coinciden con los descritos por Molari y Rondelli (2007) aunque existen diferencias entre las ecuaciones de cálculo utilizadas por los investigadores de la Universidad Pública de Navarra y por Molari y Rondelli, pues los primeros consideran una masa del tractorista de hasta 100 kg y que el esfuerzo realizado sobre los anclajes del cinturón al asiento lo realiza únicamente el propio tractorista, mientras que Molari y Rondelli estiman una masa del tractorista de tan solo 75 kg, que es superada por muchos tractoristas y, sin embargo, tienen en cuenta la masa del asiento que debe ser utilizada para calcular los esfuerzos de los anclajes del asiento al tractor pero no para los del cinturón al asiento.

Parece claro que los prototipos desarrollados hasta este momento no reúnen las condiciones necesarias para evaluar, con el suficiente rigor, la capacidad de los cinturones para mantener, durante los distintos vuelcos posibles, dentro de la zona protegida por las ROPS. Por lo tanto se hace necesario desarrollar un dispositivo de vuelco capaz de reproducir el movimiento del tractorista durante los distintos vuelcos laterales y traseros, pudiendo variar de asiento y de posición, simulando así el vuelco de tractores de diferentes envergaduras.

Este dispositivo debería poder reproducir correctamente los vuelcos que tienen dos ejes de giro, el primero la línea que une los centros de las partes exteriores de las zonas de contacto entre el suelo y las ruedas del lado sobre el que se va a producir el giro y el segundo la línea que une los puntos máximos de las ruedas de dicho lado, en el momento que impactan con el suelo. También debería ser posible reproducir y variar el ángulo real de giro, la intensidad del vuelco y el grado de amortiguación del terreno y la propia ROPS.

3.7. Patologías producidas en accidentes de tractores

Rees (1965) analizó los daños producidos por los accidentes de tractores en Inglaterra y Gales, durante el periodo Junio 1960 y Diciembre 1964, y comparó los daños producidos por un accidente de tractor con los producidos por otros vehículos. En este análisis se analizan 14 accidentes de tractor (tres de los cuales fueron mortales), y evidenció que una gran parte de las lesiones eran de tipo traumatológico, destacando las producidas en la zona torácica, pélvica, espinal, así como en las extremidades.

Entre las conclusiones concluyó que se sufrían más daños en el tronco que en la cabeza o en las extremidades, así que la tasa de mortandad en accidentes con tractor es superior a la de los accidentes de tráfico.

En muchas ocasiones se produce el agravante que en momento del accidente el tractorista está sólo y se tarda mucho tiempo hasta que se inicia las operaciones de salvamento y asistencia sanitaria, por lo que el estado de salud empeora y las posibilidades de supervivencia disminuyen.

En un estudio realizado por Goodman et al. (1985) se analizaron las causas de fallecimiento por accidente de tractor en el estado de Georgia (USA), entre los años 1971 y 1981. Se detectó que la mayor causa de las causas fue el traumatismo torácico, seguido ya a mayor distancia por problemas respiratorios (ahogamientos, asfixias y estrangulación) y a hemorragias.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Diseño de la ROPS

4.1.1. Tractores

Se han utilizado dos tractores para el desarrollo de una ROPS automáticamente desplegable utilizando un sistema pirotécnico que se despliegue tanto en anchura como en longitud (E2D-ROPS), y poder realizar pruebas para su montaje en ellos. Por un lado ha sido un tractor John Deere modelo C 60 y por otro lado un tractor Kubota modelo M 8200 DTN, versión 4 RM (Kubota SFM-82N), como el que se muestra en la figura 36, ambos equipados con un arco delantero.



Figura 36.- Tractor Kubota SFM-82N y detalle de su arco delantero de protección

La tabla 3 muestra las especificaciones de ambos tractores y la tabla 4 muestra las especificaciones de las ROPS de ambos tractores

Símbolo	Parámetro	Tractor A John Deere	Tractor B Kubota	Unidad
H1	Altura del centro de gravedad (CG)	0.723	0.703	m
L3	Distancia horizontal entre el CG y el eje trasero	0.817	1.190	m
L2	Distancia horizontal entre el CG y el eje delantero	0.901	0.810	m
D3	Altura neumáticos traseros (en carga)	1.00	1.295	m
D2	Altura neumáticos delanteros (en carga)	0.70	0.835	m
H7	Altura del capó	1.03	1.273	m
B7	Anchura del capó	0.47	0.480	m
L7	Distancia horizontal entre el CG y la esquina delantera del capó del motor	1.422	1.523	m
HO	Altura punto pivote del eje delantero	0.35	0.453	m
DO	Angulo oscilación eje delantero	0.2094	0.1292	rad
B	Anchura total mínima	1.40	1.40	m
BO	Anchura neumáticos traseros	0.33	0.440	m
S	Ancho de vía trasero	1.07	1.120	m
M	Masa del tractor (a efectos de cálculo)	1845	2050	kg
Q	Momento de inercia en torno al eje longitudinal a través del CG	289.90	399.19	kg m ²

Tabla 3.- Características de los dos tractores

Símbolo	Parámetro	Tractor A John Deere	Tractor B Kubota	Unidad
H6	Altura del punto de impacto	2.100	2.243	m
L6	Distancia horizontal entre el CG y el punto de intersección delantero de la estructura ROPS	-0.42	.054	m
B6	Ancho del ROPS entre los puntos izquierdo y delantero	0.86	0.80	m
	Ancho del ROPS en su parte inferior	1.00	0.723	m
	Sección inferior del ROPS	50x80 (espesor 8)	76.2x38 (esp. 4.6)	mm
	Sección rectangular superior del ROPS	60x60 (espesor 5)	50.8x50.8 (esp. 4.6)	mm
	Sección circular superior del ROPS	Radio 25 (espesor 5)	---	mm

Tabla 4.- Características de los arcos de los dos tractores

De estas características del tractor, nuestro proyecto modifica las correspondientes a la estructura de protección, es decir, la anchura del dispositivo de protección (B6) y la altura total (H6).

4.1.2. Diseño del E2D-ROPS

En el caso de un vuelco, el E2D-ROPS diseñado tiene que ser capaz de variar su geometría, tanto en altura como en anchura. La configuración de la ROPS tiene forma de V y el ángulo de inclinación de los pilares de despliegue es de entre 0 y 15 °, que es el mayor ángulo para proporcionar una anchura al E2D-ROPS de 1,40 m, que es la suma de la pista (S) y el neumático (B0) anchos para el tractor John Deere, siendo este el más estrecho de los dos modelos de tractores.

Los pilares están unidos en la parte superior por medio de una viga horizontal telescópica que permite aumentar la anchura del tramo superior, ya que con esta configuración permite variarla desde la posición más estrecha, que es cuando está en la parte inferior (recogido) a su posición más ancha, que se produce cuando la estructura está totalmente desplegada.

4.1.2.1. Material empleado en el E2D-ROPS

El material utilizado para el diseño y desarrollo de la estructura es el acero. Para las primeras aproximaciones de resistencia, utilizamos el tipo de acero definido por defecto en el programa “ANSYS”.

El programa no tiene en cuenta el comportamiento plástico de este acero, cuando es sometido a grandes tensiones por lo que, finalmente, desechamos su utilización. A partir de los primeros resultados obtenidos en la investigación y de la información obtenida sobre disponibilidad y coste de los aceros comerciales, elegimos el acero S275JR especificado por el Comité Europeo de Normalización (CEN, 2004), cuyas características principales, están recogidas en la tabla 5. La figura 37 muestra el comportamiento plástico de este acero.

Acero S275JR	
Densidad	7,85e-006 kg mm ⁻³
Coefficiente térmico de expansión	1,2e-005 C ⁻¹
Calor específico	4,34e+005 mJ kg ⁻¹ C ⁻¹
Conductividad térmica	6,05 e-002 W mm ⁻¹ C ⁻¹
Resistividad	1,7 e-004 ohm mm
Límite elástico a compresión	1000 Mpa
Límite elástico a tensión	275 MPa
Máxima resistencia a la tensión	500 Mpa
Máxima resistencia a compresión	2000 Mpa
Módulo de Young	1,8,e+005 MPa

Tabla 5.- Características del acero S275JR

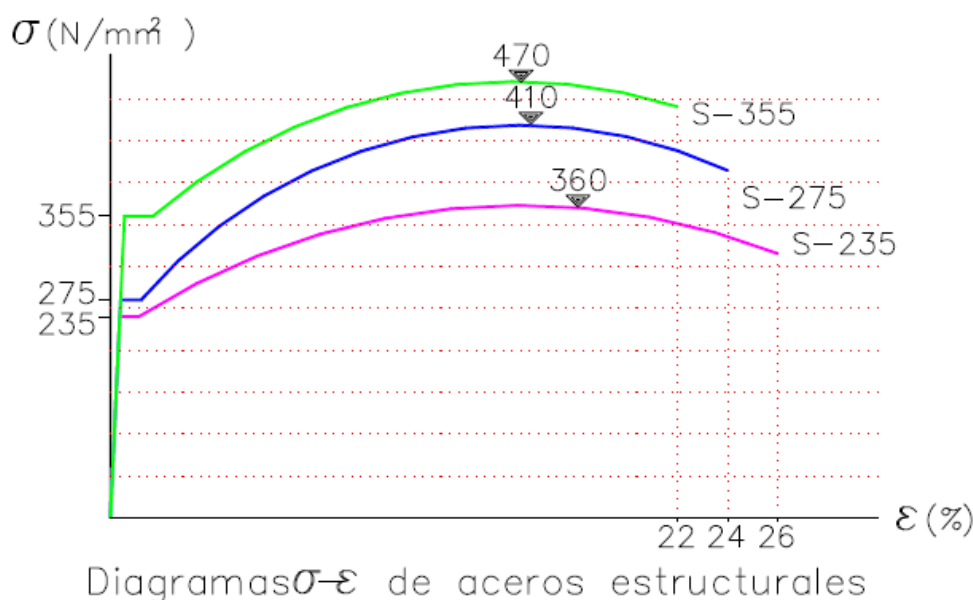


Figura 37.- Diagrama tensión-deformación del acero S275JR

4.1.2.2. El E2D-ROPS en su posición operativa

El E2D-ROPS tiene que cumplir, en la posición de funcionamiento, con todos los requisitos definidos por el Código 6, en particular en lo referente a las pruebas para verificar su idoneidad. De acuerdo con este Código, la estructura de protección sólo puede ser sometida a pruebas de resistencia cuando, tanto la prueba de estabilidad lateral, como la prueba de rodadura no continua, se han completado de forma satisfactoria.

Puesto que el E2D-ROPS que se diseña es simétrico con respecto al plano medio del tractor, la sustitución de éste por la ROPS original que tenía el tractor, no afectará a la estabilidad lateral del mismo

El objetivo de la segunda prueba es comprobar si una estructura montada en el tractor para la protección del conductor puede prevenir satisfactoriamente la rodadura continua del mismo en caso de vuelco lateral en una pendiente con un gradiente que varía de 1 a 1,5. Existe un programa informático para facilitar la determinación del comportamiento a rodadura continua o interrumpida de un tractor de vía estrecha que bascule lateralmente si dispone de una ROPS delantera (Arana et al., 2008). Este programa se ha usado para calcular la altura mínima del E2D-ROPS que permita un resultado positivo para este ensayo. Es posible que esta altura sea menor para ambos tractores que lo marcado en la tabla 4, debido a que cuanto mayor sea la anchura en la parte superior de la ROPS, menor será su altura necesaria, según lo descrito por Silileli et al. (2007) y Silileli et al. (2008).

Además, el E2D-ROPS diseñado tiene que ser capaz de lograr un resultado positivo en la secuencia de pruebas definida por el Código 6 cuando se verifica en su posición operativa (desplegada). El Código 6 es el procedimiento de la OCDE para los ensayos oficiales de ROPS de montaje frontal en tractores agrícolas y forestales de ruedas, de vía estrecha, aplicables a los tractores equipados con estructura de protección al vuelco de dos montantes instalados por delante del asiento del conductor, que tiene las siguientes características:

- Una distancia al suelo de no más de 600 mm por debajo de los puntos más bajos de los ejes delantero y trasero.
- Una vía mínima fija o ajustable con uno de los ejes de menos de 1 150 mm con neumáticos de gran tamaño.
- Una masa en vacío superior a 400 kg e inferior a 3500 kg.
- Una masa máxima autorizada que no exceda de 5.250 kg y una relación de masa no superior a 1,75 (OCDE, 2012).

Además, el Código 6 requiere que la suma de las anchuras de pista y de los neumáticos ha de ser mayor que la anchura de la estructura antivuelco. Las cargas longitudinales (trasero y delantero) deben continuar hasta que la energía absorbida por la estructura de protección sea igual o superior a la energía de entrada requerida establecida por las ecuaciones del Código 6 y lo mismo para las fuerzas que se aplicarán durante las pruebas de aplastamiento.

Para ser aceptado en virtud de las normas de ensayo, las ROPS deben cumplir una serie de condicionantes adicionales, tanto durante como después de la finalización de las pruebas:

- Después de cada prueba parcial, la ROPS debe estar libres de grietas y roturas, y no deben ejercer ninguna fuerza sobre la estructura del asiento.
- Ninguna parte de la estructura de protección deberá invadir la zona libre, referido al punto de referencia del asiento (SIP), y todas las partes de la zona libre estarán protegidos por la estructura
- La deformación elástica deberá ser inferior a 250 mm.

Por ello, se considera que se está "fuera de la protección de la estructura" si alguna parte de la Zona de Seguridad entra en contacto con el suelo si el tractor vuelca hacia la dirección desde la que se aplica la carga de prueba.

Para estimar esto, los neumáticos y los ajustes de anchura de pista deben ser del tamaño estándar mínima especificada por el fabricante.

4.1.2.3. El E2D-ROPS en su posición replegada

En la posición inferior el E2D-ROPS debe permitir que el tractor funcione en situaciones de baja altura, tales como frutales, jardines, caballeriza. El E2D-ROPS, situado en esa posición, no debe reducir el campo de visión del conductor. En el diseño del prototipo sin embargo, esta circunstancia no se ha optimizado, ya que no se podía dañar ni el capó del tractor durante los ensayos, y además facilitaba el montaje y desmontaje del mismo para acceder al sistema de bloqueo. A pesar de esto, el E2D-

ROPS finalmente desarrollado cumple los requerimientos de la directiva del campo de visión.

4.1.2.4. *Tamaño y forma del E2D-ROPS*

La utilización de un E2D-ROPS proporciona al tractorista un nivel de seguridad y comodidad mucho mayor del que le otorga el arco de seguridad abatible que se monta de serie en el citado modelo de tractor. El nivel de comodidad superior está perfectamente claro porque los arcos de seguridad abatibles deben ser devueltos a su posición operativa, de forma manual en este caso, todas y cada una de las veces en que ha sido necesario abatirlos por la labor específica que ha requerido este abatimiento del arco. Como se ha reflejado en la introducción, esto sucede en numerosas ocasiones y debe hacerse en el momento en que se termina la tarea que requiere el abatimiento del arco y, además, requiere un gran esfuerzo por parte del tractorista y es la causa de numerosas lesiones musculares. El nivel de seguridad que proporciona el E2D-ROPS es mucho mayor que el proporcionado por la ROPS abatible manualmente porque este proporciona una nula seguridad en su posición abatida y la experiencia nos dice que una gran parte de los agricultores, en la mayoría de las ocasiones, no realiza la reposición del mismo a su posición segura sino que el arco permanece en su posición inferior durante largos períodos de tiempo y esto es la causa de la mayoría de los accidentes fatales ocurridos en vuelcos de tractores equipados con arcos de seguridad, tal y como se ha reflejado en la introducción.

Sin embargo, el carácter automontante del E2D-ROPS produce un aumento del coste de fabricación del mismo por ser la estructura telescópica, requerir sensores y un sistema de maniobra, impulsión y bloqueo de la parte móvil del E2D-ROPS, por lo que es interesante reducir, en lo posible, el aumento del coste de fabricación generado por la sustitución de una ROPS abatible por el E2D-ROPS

Para reducir este coste se puede actuar en dos direcciones. La primera sería la reducción de la altura total de la ROPS y la segunda la reducción de su sección.

La reducción de la altura total del arco de seguridad delantero es posible porque la altura de la ROPS viene determinada por el requerimiento de imposibilidad de rodadura continua establecido en el Código 6. El tractor, en caso de vuelco, no debe dar la vuelta de campana.

Una ROPS impedirá en mayor o menor medida esta rodadura continua cuanto mayor o menor sea su altura y su anchura superior. Por lo tanto, existen dos formas de impedir la rodadura continua: diseñar una ROPS más alta o más ancha.

En el diseño del E2D-ROPS se ha elegido un sistema doblemente desplazable, en altura y en anchura, de forma que el paso de la posición de reposo (inferior) a la posición operativa (superior) implica, además de un desplazamiento vertical de la parte móvil de la ROPS que produce un aumento de su altura, un aumento de la anchura superior de la ROPS que se consigue porque las barras desplazables forman un cierto ángulo con la vertical y porque la barra transversal que une las partes superiores de las barras desplazables tiene un sistema telescópico que permite un desplazamiento transversal al plano de simetría del tractor y un aumento de la anchura superior del arco de seguridad. Es importante resaltar que este aumento de la anchura superior del arco le dota de una mayor capacidad de impedir la rodadura continua por lo que es posible reducir la altura del arco de seguridad.

De la misma forma, es posible reducir la sección resistente de los puntos críticos del arco de seguridad, situados normalmente en las partes inferiores de sus barras verticales, cerca de sus acoplamientos al bastidor del tractor.

Es importante recordar, que las secciones resistentes deberán ser mayores cuanto mayores sean los momentos flectores que se producen, en las secciones críticas, durante el vuelco. Estos momentos flectores aumentarán cuando aumenten los esfuerzos máximos producidos, durante el vuelco, por la acción del suelo sobre la parte superior del arco y cuando aumente la distancia del punto de aplicación de este esfuerzo a la citada sección crítica. Es decir, que el momento será mayor cuanto mayor sea el esfuerzo y cuanto mayor sea la altura de la ROPS. Ya ha quedado claro que nuestro sistema reduce la altura total de la ROPS pero, además, de acuerdo a lo especificado en el Código 6, la ROPS debe ser capaz de absorber una determinada cantidad de energía,

durante el ensayo lateral, que es el ensayo crítico, que solo depende de la masa del tractor por lo que es el mismo para el tractor, con independencia de que se monte una u otra ROPS. Por lo tanto, para absorber esa cantidad de energía se requiere un esfuerzo tanto menor cuanto mayor sea la deformación admisible. Como la deformación admisible es la máxima que no haga que el arco invada la zona de seguridad, perfectamente definida en el Código 6 e independiente del tipo de ROPS instalada, aquel arco que tenga la mayor anchura superior admitirá una mayor deformación, sin incumplir los requerimientos del Código 6, y soportará, durante el ensayo lateral, un esfuerzo máximo menor. Por lo tanto, es posible en este caso que la sección sea menor que la original, al disminuir la fuerza aplicable.

Por lo tanto, se puede diseñar el E2D-ROPS con una altura menor que la de partida y con unas secciones en las barras resistentes menores de las necesarias en el sistema tradicional, lo que supone un abaratamiento del coste en materiales.

Además, el aumento de la anchura superior del arco delantero reduce la energía total del vuelco lateral, que suele ser el crítico, porque reduce el descenso del centro de gravedad del tractor desde su posición inicial, antes del vuelco, hasta su posición en el momento del impacto de la parte superior del arco con el suelo, lo que sucede porque cuanto más ancho es el arco, antes impacta contra el suelo. (Silleli, 2007), así como la fuerza del impacto y los momentos producidos por el mismo.

Otro aspecto digno de tener en consideración es la zona efectivamente protegida durante el vuelco o el ensayo, que podría ser definida como la zona que queda libre tras el vuelco o los ensayos, y que siempre debe incluir totalmente la zona de seguridad (ya que el arco no tiene que invadir nunca la misma). La zona de seguridad está claramente definida en el Código 6 y es independiente del arco de seguridad, ya que es una especificación técnica. Sin embargo, la zona de efectivamente protegida depende de la estructura de protección elegida para el modelo de tractor. El aumento de la anchura superior del E2D-ROPS, con respecto a la ROPS fija original, hace que esta zona protegida, en el caso de vuelco lateral, sea mayor en este arco que en el original.

4.1.2.5. Sistema de despliegue y bloqueo

Para el sistema de despliegue y bloqueo se tuvo en consideración que no podía intervenir el tractorista, ya que iba a ser realizado de forma automática, utilizando para ello sensores e infladores de airbag, ya que proporcionan la máxima fiabilidad a largo plazo y puede funcionar correctamente durante la vida útil del tractor en el que están instalados

En esta investigación se evaluaron dos opciones: instalar sólo un inflador situado en la viga transversal del E2D-ROPS e instalar dos infladores en sus vigas inclinadas.

Respecto al sistema de bloqueo, y entendiendo el rápido incremento de presión que se iba a producir en su interior durante la fase de activación, ya que la fase de generación del gas dura milisegundos, se optó por un sistema de varillas de acero en el interior del E2D-ROPS, de tal forma que bloquearan el mismo una vez se hubiera producido la expansión

4.1.3. Software utilizado para el desarrollo del E2D-ROPS

Para realizar los primeros cálculos del E2D-ROPS se han utilizado dos programas informáticos específicos desarrollados por la Universidad Pública de Navarra, denominados “*vuelco3.xls*” y “*dasterema.xls*”. Ambos programas son de distribución gratuita desde la página de la propia universidad www.unavarra.es (Arana et al., 2008)

El primer programa “*vuelco3.xls*” es un sencillo software que cumple con el Código 6 mediante el cual se pueden realizar pruebas para estudiar si las dimensiones de nuestra estructura son las correctas. Se basa en la introducción de una serie de parámetros de nuestro tractor para ver si con la estructura diseñada el tractor vuelca o no. Si vuelca, la estructura no sirve y si no vuelca, la estructura es en una primera aproximación válida. En la figura 38 se muestra un detalle del entorno del programa “*vuelco3.xls*”.

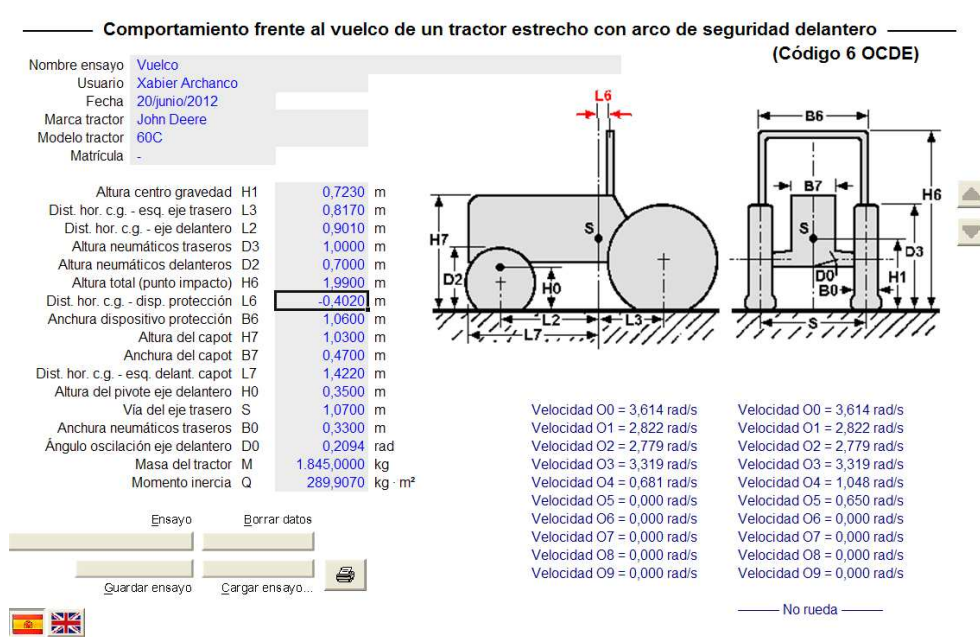


Figura 38.- Detalle del entorno del programa “Vuelco3.xls”

Posteriormente utilizamos el software “*dasterema.xls*” que proporciona una primera aproximación de cómo debe ser la sección de nuestra estructura. Este programa calcula de las dimensiones de la estructura de protección, para el caso de ROPS delantera.

Una vez conocida esta primera aproximación de las dimensiones y secciones de la estructura se diseñó la misma, utilizando el software informático “*Solid Works 2010*” (SolidWorks Copr., Massachussetts, USA), que es un programa de diseño en tres dimensiones, mediante el cual se han generado los modelos tridimensionales tanto del tractor como de las distintas AD-ROPS para ensayar. En la figura 39 se muestra el modelado de los dos tractores a los cuales se les ha acoplado el E2D-ROPS.

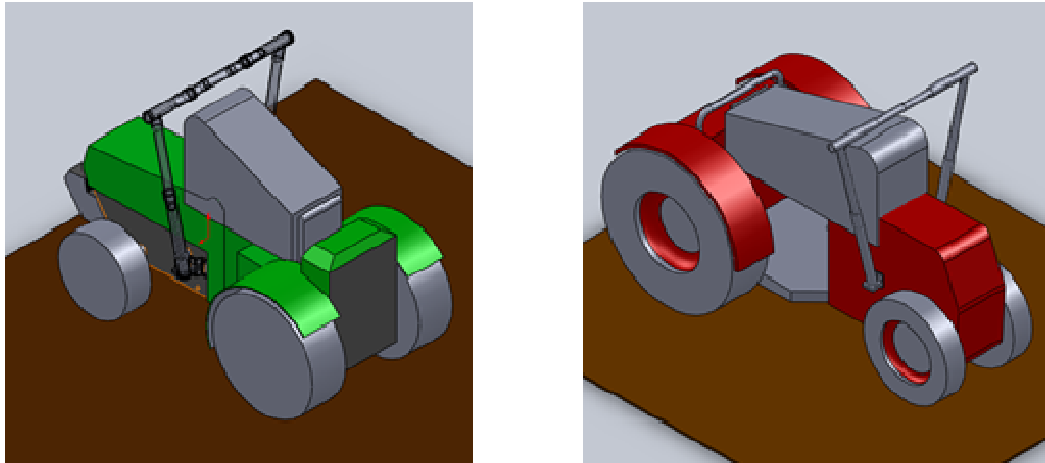


Figura 39.- Modelado en 3D de John Deere 60C y Kubota M8200D con el E2D-ROPS

Sobre estas estructuras se simulan los esfuerzos que reciben durante los ensayos, definidos en el Código 6, y las deformaciones que, en estas estructuras, producen estos esfuerzos. De esta forma podemos evaluar la forma en que las estructuras se comportan durante los ensayos normalizados, si sufren deformaciones admisibles o éstas son de tal magnitud que hacen que el arco invada la zona de seguridad y, de la misma forma, se evalúan las tensiones máximas sufridas por las secciones críticas y se evalúa si éstas están por encima o por debajo del límite elástico del material empleado. Es decir, si se produce invasión de la zona de seguridad o colapso del E2D-ROPS.

Para ello se ha utilizado un programa de análisis por Elementos Finitos “Ansys WorkBench” en su versión 14.0 (ANSYS Inc. Canonsburg, USA), el cual ya ha sido utilizado y validado con anterioridad (Alfaro et al. 2010). Para simular el comportamiento plástico del E2D-ROPS, hubo que definir dentro del propio programa ANSYS el diagrama de tensión-deformación específico del material utilizado (S275JR).

El E2D-ROPS se monta en el chasis del tractor por medio de tornillos y se realiza un mallado con elementos tetraédricos por todo el volumen del E2D-ROPS, ya que se pueden adaptar adecuadamente a diferentes geometrías. En su diseño se optó por un algoritmo de auto-mallado (Alfaro et al. 2010), tal y como se observa en la figura 40

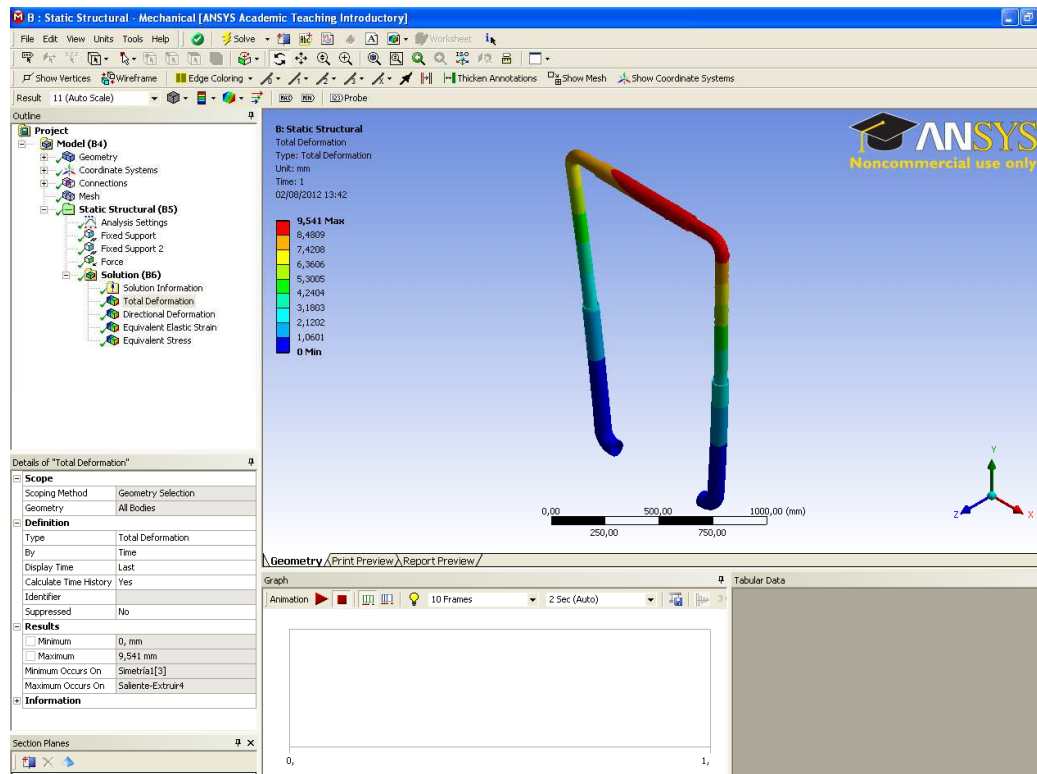


Figura 40.- Detalle de tensiones sufridas en las distintas secciones del AD-ROPS, durante el ensayo de carga lateral, calculadas por el programa “ANSYS”

4.2. Universalización del diseño e ingeniería de las AD-ROPS

4.2.1. Diseño de las AD-ROPS

Para analizar el funcionamiento de las AD-ROPS se han utilizado cuatro modelos, el E2D-ROPS y tres AD-ROPS, diseñadas y construidas basándose en el E2D-ROPS, por la empresa AIR-ROPS NA 2012 S.L. Las AD-ROPS han sido denominados A, B y C y diseñadas para montarlas en tractores del tipo T2 con masas de 500 kg, 1000 kg y 2500 kg respectivamente, tal y como se observa en la figura 41.



Figura 41.- Modelos de AD-ROPS construidas por la empresa AIR-ROPS NA 2012 S.L.

La AD-ROPS C es muy similar al E2D-ROPS, mientras que los modelos A y B son más pequeñas por lo que no es posible instalar los infladores de airbag en el interior de los brazos inclinados inferiores, por lo que se debe instalar uno en el interior del brazo horizontal superior. Las ROPS han sido fabricadas utilizando acero S275JR. Las características de diseño de las distintas AD-ROPS se muestran en la tabla 6.

Modelo ROPS	Masa diseño de referencia	Diámetro hembra barra inferior	Diámetro macho barra inferior	Diámetro hembra barra superior	Diámetro macho barra superior
A	2500 kg	70 mm	60 mm	55 mm	45 mm
B	1000 kg	55 mm	45 mm	40 mm	30 mm
C	500 kg	50 mm	44 mm	40 mm	30 mm

Tabla 6.- Características de diseño de las AD-ROPS

4.2.2. Infladores de airbag

Los infladores analizados pertenecen a las series SHI2, fabricados por TRW Airbag System Gmb (Einkauf, Alemania). En la figura 42 se muestra la información relativa a los 15 infladores de esta serie comercial, en concreto, la presión que es capaz de proporcionar cada inflador a un volumen normalizado de 28,3 litros y el tiempo que tarda en proporcionarlo.

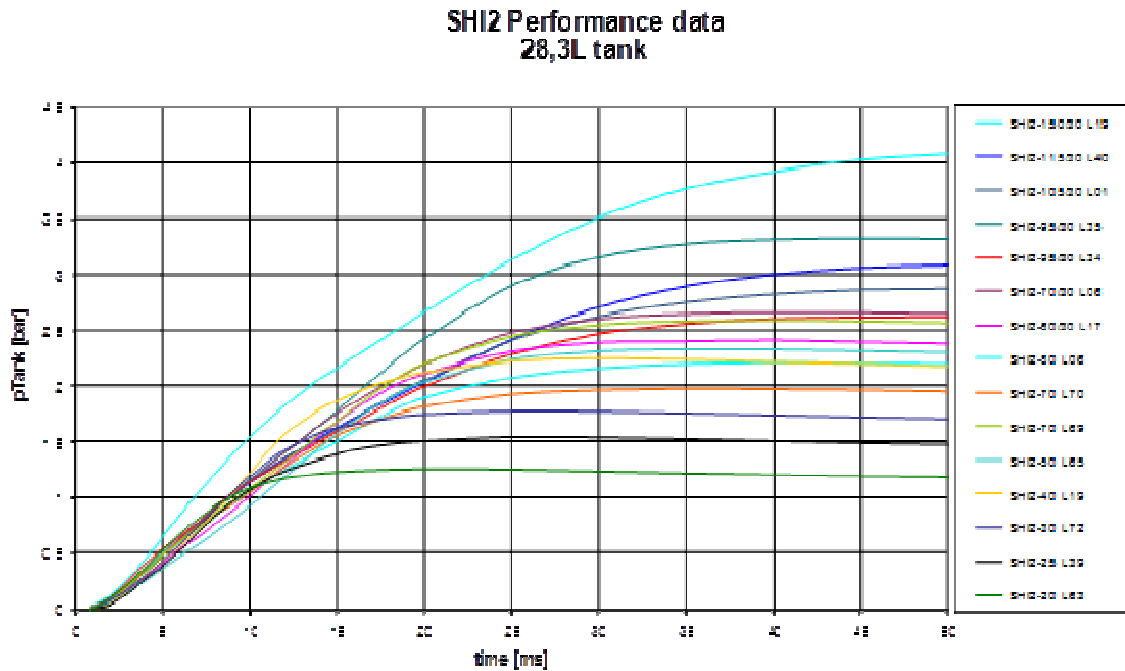


Figura 42.- Curvas de presión-tiempo de 15 infladores de la serie SHI2, fabricados por TRW (cortesía de TRW)

Para las pruebas se optó por utilizar dos tipos de infladores. El primer modelo es una versión inflador híbrido SH-20 V614 y el segundo es una versión inflador híbrido SH-30 V612. El SH-20 V614 proporciona 0,4267 moles de gas equivalente a 13 g de gas frío (97% de Ar, 3% de He) y 3,4 g de gas caliente pirotécnico. El SH-30 V612 proporciona 0,6457 moles de gas equivalente a 20 g de gas frío (97% de Ar, 3% de He) y 3,5 g de gas caliente pirotécnico.

Las figuras 43 muestran las curvas de presión-tiempo y de flujo de masa-tiempo correspondientes a los dos infladores citados.

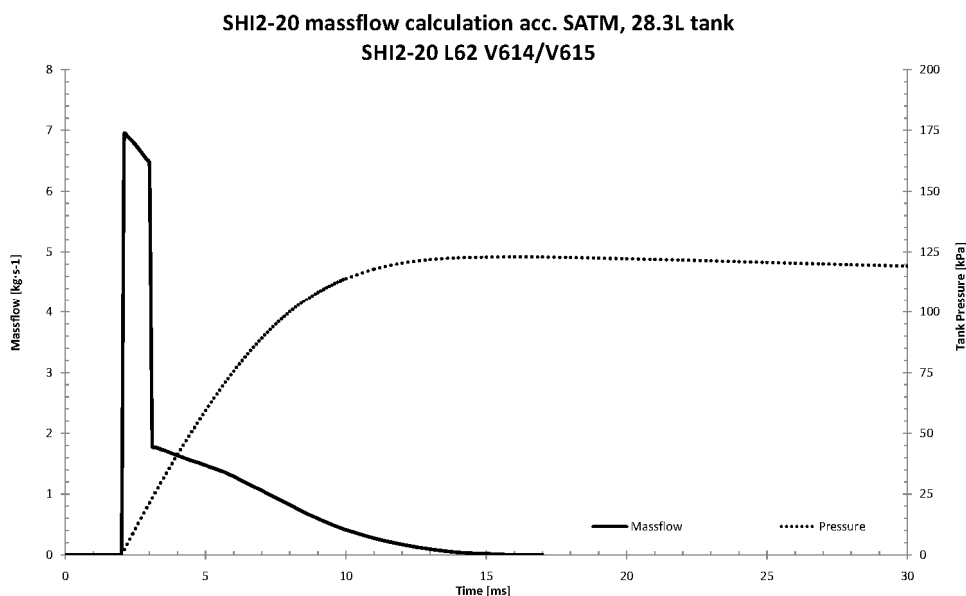


Figura 43a.- Gráfico de expansión para el inflador SHI2-20

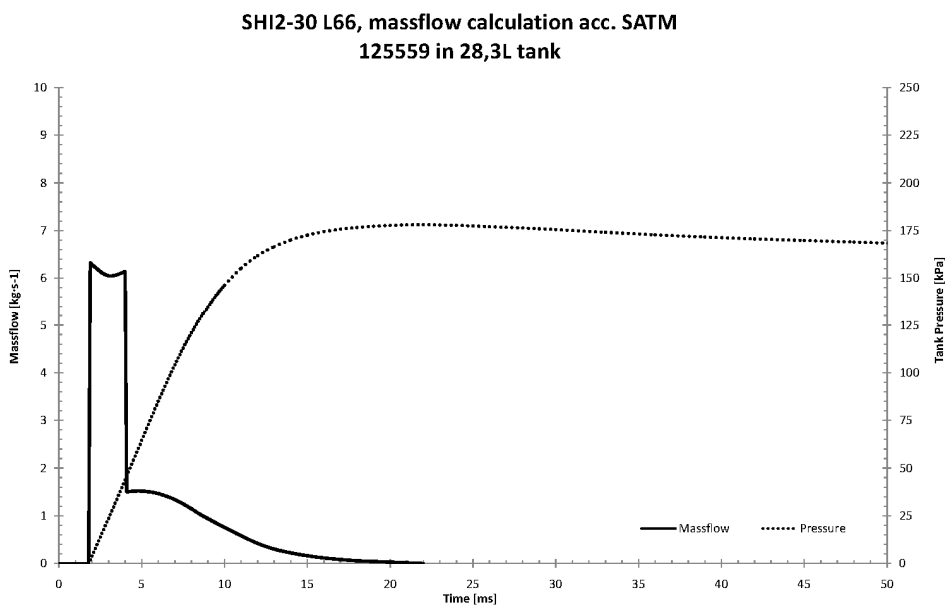


Figura 43b.- Gráfico de expansión para el inflador SHI2-30

4.2.3. Ensayos de las ROPS

4.2.3.1. Ensayos con aire comprimido

Las tres AD-ROPS han sido probadas en el laboratorio del Campus de Tudela de la Universidad Pública de Navarra, evaluándose la capacidad de los mismos para desplegarse por medio de aire comprimido. Para ello se utilizó un compresor equipado con una válvula de regulación de presión y un manómetro. El compresor seleccionado fue capaz de proporcionar una presión de hasta 1 MPa. Para probar las AD-ROPS, éstas fueron atornilladas a una base de acero, colocándose en posición vertical. La presión utilizada fue de 0,8 MPa.

4.2.3.2. Pruebas de desarrollo utilizando infladores airbag

Se han realizado nueve ensayos sobre las tres AD-ROPS, utilizando los infladores de airbag. Dos se realizaron en el modelo A, dos en el modelo B y 5 en el modelo C, tal y como se observa en la tabla 7

AD-ROPS	Nº Airbag	Tipo inflador	Localización
A	1	SHI2-30V612	Tubo transversal superior
A	1	SHI2-30V614	Tubo transversal superior
B	1	SHI2-30V612	Tubo transversal superior
B	1	SHI2-30V614	Tubo transversal superior
C	2	SHI2-30V612	Tubos inclinados inferiores
C	2	SHI2-30V614	Tubos inclinados inferiores
C	1	SHI2-30V612	Tubo transversal superior
C	1	SHI2-30V614	Tubo transversal superior
C	1	SHI2-30V612	Tubo inclinado inferior

Tabla 7.- Pruebas en distintas AD-ROPS usando varias configuraciones

En los modelos A y B no se utilizaron ensayos con infladores instalados en los tubos inclinados ya que existía, en estos tubos, espacio suficiente para introducir los infladores. Los tiempos de despliegue de los mismos se midieron con un cronómetro de precisión del propio campus de Tudela

4.2.3.3. *Ensayos de vuelco real*

Se realizaron varias pruebas de vuelco real, montando la AD-ROPS A en un quad, por detrás de su asiento. Este vehículo se equipó con un inclimando (sistema electrónico de control que a través de una serie de sensores, entre los que se encuentran tres inclinómetros, analiza la posibilidad de vuelco activando los infladores en caso necesario), el cual se analizará con posterioridad, el cual activaba el airbag cuando el vehículo alcanza los 50°. La AD-ROPS se colocó en la parte posterior del asiento del conductor y el sensor en la parte delantera del asiento, tal y como se observa en la figura 44.

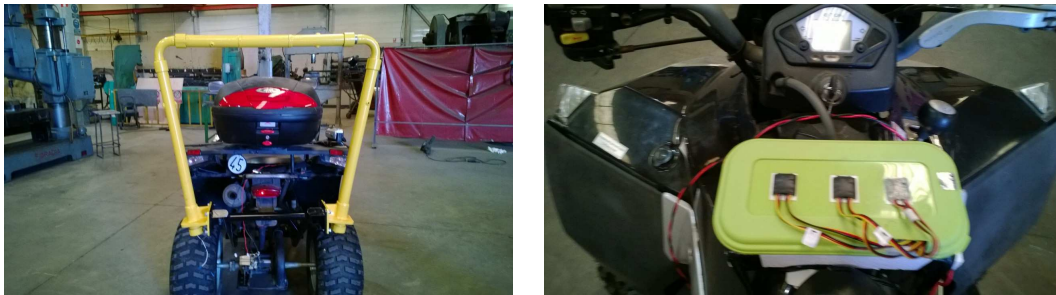


Figura 44.- Quad de prueba con detalle de la AD-ROPS montada y del inclimando

Se colocó el quad de tal forma que las dos ruedas de la izquierda descansaban sobre el terreno mientras que las de la derecha lo hacían sobre una plataforma móvil que puede ser levantada por medio de cilindros hidráulicos a baja velocidad, de tal manera que es posible provocar el vuelco lateral del quad. Se colocó una lona de amortiguamiento en el suelo para minimizar los daños en el vehículo durante el vuelco. En la figura 45 se puede ver una imagen del ensayo en la que se muestra el quad antes de alcanzar el ángulo de vuelco.

Para comprobar la capacidad de la AD-ROPS para proteger al conductor durante el vuelco, se utilizó un maniquí sujeto por una correa. Tanto el tiempo de despliegue como el vuelco fueron medidos utilizando una cámara de vídeo de alta velocidad.



Figura 45.- Prueba de vuelco en Quad

4.2.3.4. Ensayos de las AD-ROPS de acuerdo a la metodología Código 6

Se realizaron sobre las AD-ROPS A, B y C los ensayos que se realizan normalmente para la homologación de los tractores estrechos de acuerdo a los requerimientos especificados en el Código 6 de la OCDE. Estos ensayos fueron realizados en la Estación de Mecanización Agrícola (EMA) en Madrid, que es la única estación de Ensayos autorizada en España para realizar este tipo de ensayos, con el fin de realizar las pruebas necesarias para verificar si este tipo de estructuras hubieran sido susceptibles de ser homologadas en el caso de que hubieran sido montadas en un determinado modelo de tractor.

Las tres AD-ROPS se prepararon y se ensayaron en su posición desplegada y bloqueados de acuerdo con el Código 6 de la OCDE. Para ello, las ROPS se sometieron a la secuencia de pruebas definidas por el Código 6, que consta de una prueba posterior, una prueba lateral, una prueba frontal y dos pruebas de aplastamiento.

Estas tres AD-ROPS no fueron instalados en tractores reales, sino sobre soportes diseñados específicamente para estas pruebas, que simulaban su anclaje a un punto duro del chasis, por lo que no se pudo analizar si la zona de seguridad era invadida durante los ensayos, aunque fue posible establecer los esfuerzos y deformaciones producidas durante los ensayos hasta el momento en que la energía total absorbida por las ROPS

alcanzó el valor que permite la detención de cada ensayo, de acuerdo al Código 6 y para unas masas de referencia de 500 kg, 1000 kg y 2500 kg, respectivamente para las AD-ROPS A, B y C..

4.2.4. Software para analizar la idoneidad de las AD-ROPS

En este caso se optó por utilizar el programa informático NX8.5 de la compañía Siemens para hacer un desarrollo simplificado de las AD-ROPS, de su deformación, así como de un tractor, el cual tiene la opción de parametrizar los datos lo que simplifica realizar las distintas pruebas, y además facilita la generación de volúmenes y áreas lo que permite visualizar de forma rápida las zonas de interferencia.

4.3. Sistema de activación del E2D-ROPS

Para construir el inclinando responsable del control de la inclinación y de la toma de decisión respecto al momento de activación de los infladores que despliegan el E2D-ROPS, se han utilizado elementos existentes en el mercado, de uso extendido, para optimizar la fiabilidad, la facilidad del montaje y el coste del equipo. En el caso de que se puedan prever condiciones extremas como vehículos para zonas desérticas o polares o en el caso de que el vehículo tenga características especiales, se podrían utilizar elementos más específicos que cumplan otros estándares más exigentes.

En la elección de los elementos se han tenido en cuenta las siguientes condiciones de terminadas por los parámetros que se citan:

- Tiempo de despliegue, definido en la ANSI/ASABE S599 como el tiempo empleado por la AD-ROPS para pasar de la posición retraída a la totalmente desplegada.
- Ángulo de activación que es el ángulo elegido para que se produzca el despliegue de la AD-ROPS. Este ángulo depende del tiempo de despliegue y puede ser tanto mayor cuanto menor sea el tiempo de despliegue. Cuanto mayor es el ángulo de activación menor es el peligro de despliegues

indeseados, de falsos positivos, aunque en este caso el tiempo de despliegue debe estar más ajustado antes del impacto.

- **Fiabilidad:** Como cualquier equipo electrónico, puede existir un fallo, generalmente producido en los sensores, que pueden producir un falso negativo (no activarse cuando debiera) o un falso positivo (activarse cuando no debiera). Para minimizar estas situaciones, el sistema es redundante
- **Tiempo útil de la batería tras parada del motor.** La batería debe ser capaz de activar el sistema de despliegue de la AD-ROPS hasta 6 segundos después de la parada del motor. Se han utilizado baterías recargables, capaces de generar una diferencia de potencial de 12 voltios durante un minuto. El motivo es que es necesario garantizar que en el caso de que el tractor sufriera un impacto, por ejemplo de un camión, que le dañara la batería principal, el sistema de control dispondría de carga suficiente para activar el despliegue de la AD-ROPS, en el caso de que el impacto concluyera en vuelco. En la figura 46 se puede ver las consecuencias del impacto de un camión contra la rueda trasera de un tractor lo que pudo provocar la pérdida de la batería y el vuelco del mismo.



Figura 46.- Tractor embestido por camión en Tudela

Los elementos utilizados para la evaluación del entorno de la operatividad del sistema y del riesgo de vuelco han sido sensores de ángulo de inclinación, de presencia del tractorista en su asiento, de cinturón de seguridad de encendido del interruptor del tractor y de los infladores.

4.3.1. Sensores

4.3.1.1. Sensor de ángulo de inclinación del tractor

Es el sensor principal pues analiza el riesgo de vuelco del tractor. Se ha utilizado un acelerómetro de dos ejes, basado en el circuito ADXL322 de Analog Devices. Este circuito es un sensor acelerómetro con un rango de $\pm 2g$. La salida de cada canal proporciona una tensión entre 0 y 5 V que es proporcional al ángulo en el plano X e Y en el que se encuentra el sensor. De esta forma, el sensor indica el ángulo de inclinación en el que se encuentra el circuito en dos planos, el plano de simetría del tractor y el plano vertical, perpendicular a dicho plano de simetría punto en el que se coloca el sensor. Es necesario un sensor de doble eje porque el vuelco del tractor puede ser lateral, trasero o delantero.

El circuito, mostrado en la figura 47, se conecta con dos conectores independientes que incluye cada uno dos cables de alimentación y uno que traslada la señal del sensor al microprocesador. El sensor es ligero y de escaso espesor, de bajo consumo, estable, con una resolución de 2 mg a 60 Hz, preciso y sensible, pues en ambos ejes tiene un margen de tan solo 0,1 grados.

La ventaja de que los sensores dispongan de dos salidas independientes, uno en cada eje, es que en caso de fallo de una parte del circuito, la otra parte está operativa y además se puede configurar de forma independiente cada uno de los ejes, ya que en cada caso se han podido colocar con pequeñas variaciones y en programación tiene la capacidad para regularlo, con lo que se incrementa la fiabilidad.



Figura 47.- Sensor de inclinación utilizado

4.3.1.2. Sensor de presencia del tractorista en el asiento del tractor.

Es un sensor de presión que nos indica si hay la presencia o ausencia de una persona sentada en el asiento lo que indica la inclusión del tractorista en la zona que va a proteger la AD-ROPS, en su posición desplegada. Hemos elegido un sensor como los que se usan habitualmente en los vehículos automóviles, tanto asociado al airbag como al indicador de cinturón de seguridad, porque es fácil de colocar en el asiento y es capaz de detectar al tractorista sentado en el asiento de varias formas.

Su misión es detectar si está el conductor sentado y en función de la legislación y del equipo, el algoritmo estará programado para actuar de una forma específica. El sensor del asiento es obligatorio para los cortacéspedes, de acuerdo a la norma ANSI /ASABE S599 y si el conductor no está sentado, el dispositivo no debe dispararse.

Se ha seleccionado un sensor del modelo YY-03 de la marca Quinglin, mostrado en la figura 48, con 8 membranas de contacto distribuidas uniformemente en la superficie del asiento, que pueden ser diseñadas para adaptar la sensibilidad táctil en función de la forma, rigidez y elasticidad del asiento del tractor.



Figura 48.- Sensor de presencia del tractorista en su asiento

4.3.1.3. Sensor de cinturón

Es un sensor de contacto como el mostrado en la figura 49, que nos informa si el cinturón de seguridad está abrochado. Este sistema se utiliza habitualmente en los automóviles y suele ir asociado a un circuito de control y a un avisador acústico y, en algunos modelos, al airbag del vehículo. Consiste en un contactor situado en el cinturón de seguridad, que se puede posicionar tanto en abierto como en cerrado. Este sensor es optativo y complementario al sensor de asiento, y en función de la distinta legislación y uso del equipo, el algoritmo indicaría desde una señal de alarma, a una anulación del disparador.

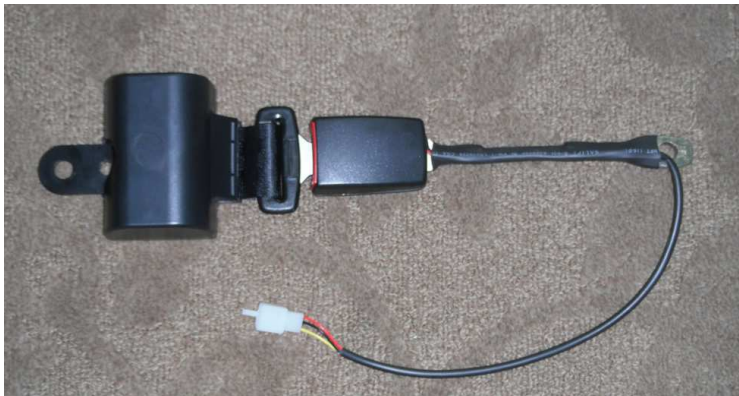


Figura 49.- Sensor de cinturón de seguridad

4.3.1.4. Interruptor de encendido

Se ha incluido un interruptor, asociado a la llave de contacto del vehículo, para habilitar el sistema para su funcionamiento. Además de dar paso a la corriente eléctrica, habilita la carga de un dispositivo a base de acumuladores de energía para que en caso de pérdida de la batería principal en el impacto producido por el accidente de tráfico, los disparadores puedan seguir funcionando, al menos durante 6 segundos después del impacto. De esta forma, el sistema sigue operativo, durante este tiempo, en caso de corte de corriente.

La razón por la que se ha asociado la activación del sistema a la llave de contacto es garantizar su operatividad durante el funcionamiento normal del tractor, evitando que el sistema pueda ser desactivado por el tractorista de forma manual y también el

despliegue accidental durante operaciones de mantenimiento que puedan necesitar inclinar el tractor pero en estas operaciones no requiere que el sistema esté arrancado.

4.3.1.5. Sensor de operatividad del mecanismo de disparo

Los infladores del disparador incluyen internamente un sistema que indica su operatividad, y para ello como máximo se puede utilizar una corriente de 0,4 A durante un período máximo de 6 segundos, con lo que nos indica la continuidad del circuito interno. Por esta razón, se ha seleccionado una intensidad de 0,1 A para comprobar la operatividad (verificando la continuidad del circuito) y para ello se ha incluido en el circuito una resistencia de 50 Ω en serie y se aplica una diferencia de potencial de 5 V (la cual es la tensión de trabajo del microprocesador), con lo que conseguimos esta intensidad. La duración en nuestro caso será de un segundo, con lo que estamos dentro de los límites.

4.3.2. Microcontrolador

El microcontrolador analiza las señales de los distintos sensores en función de un software específicamente diseñado para ello y en función de los datos activa los distintos dispositivos y/o alarmas. Se han utilizado dos sistemas distintos, que disponen de un microprocesador y de una placa de control donde se integran los distintos componentes auxiliares y se conectan los sensores, los indicadores y actuadores.

4.3.2.1. Sistema BX-24

El microcontrolador BX-24 (o bien Basic X-24), fabricado por NetMedia, incluye, en un circuito del tamaño de un chip de 24 patas, un microcontrolador Atmel, una memoria EEPROM de 32Kbytes, un regulador de tensión y un puerto RS232, de forma que basta con escribir los programas en Basic en el PC y luego volcarlos al módulo, para que este los ejecute de forma totalmente autónoma. Puede alimentarse

desde cualquier tensión entre 5 y 24 V usando el regulador interno, o bien una fuente regulada entre 3 y 5.5V.

Las características técnicas de este microcontrolador, mostrado en la figura 50, son:

- 8 Convertidores Analógicos a digitales de 10-bit independientes (ADCs), los cuales también pueden funcionar como un puerto de entrada / salida TTL)
- 16 Líneas de entrada / salida (8 TTL mas 8 ADCs y/o TTL)
- Frecuencia de muestreo de los puertos ADC de máximo 6000 por segundo
- Puerto serie con bufer y velocidad entre 300 y 19.200 baudios disponible en cualquiera de los puertos de entrada salida.
- Puerto serie de alta velocidad con bufer. (2400 - 460800 baudios).
- Interfaz SPI (Interfaz Serie de programación 'In situ')
- 400 bytes de RAM
- 32 KB de EEPROM Para almacenamiento de programas y datos del usuario descargables por el puerto serie o paralelo.
- Velocidad de ejecución de programación de 83000 líneas de código por segundo
- Incluye regulador de tensión en el propio chip.
- 2 Leds verde y rojo de montaje en superficie, controlables por el usuario.
- Reloj calendario en tiempo real.
- Multitarea
- Procesador matemático de coma flotante IEEE
- Rango de temperatura de trabajo de -40C a +85C

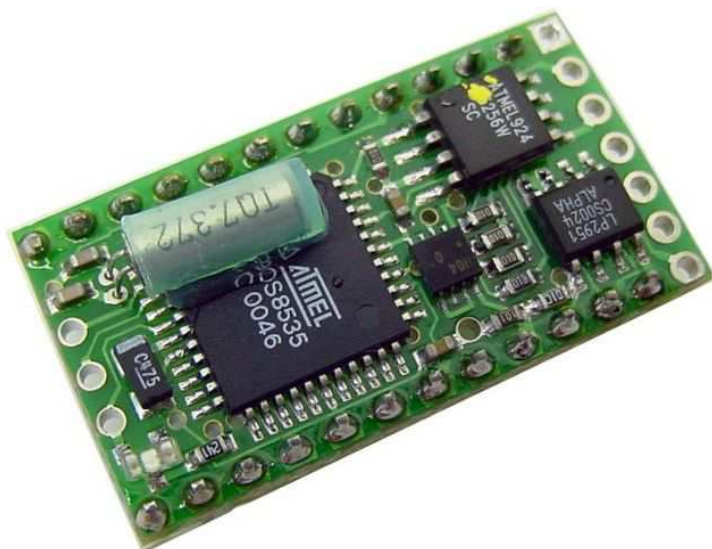


Figura 50.- Microcontrolador BX-24

El esquema eléctrico del Microcontrolador BX-24 se muestra en la figura 51.

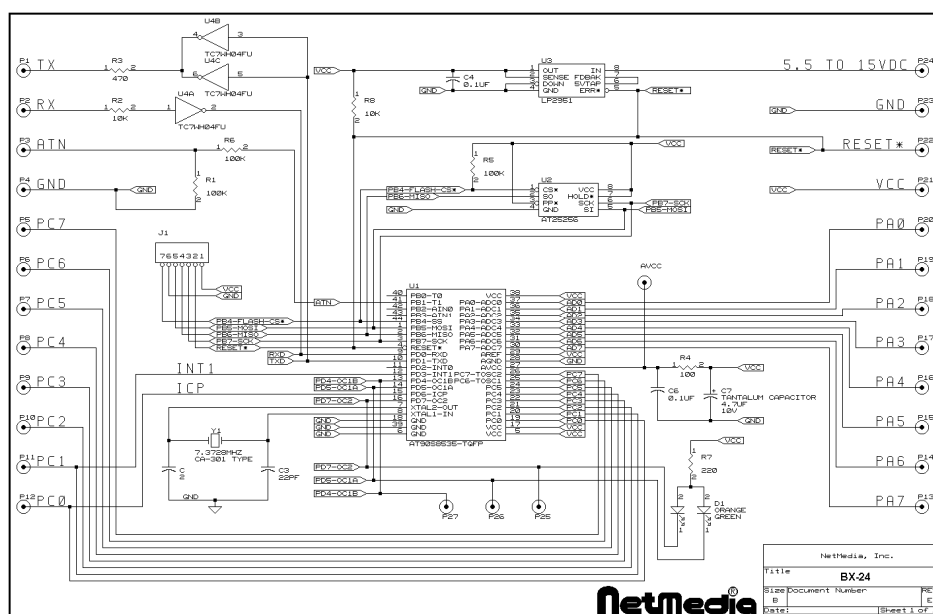


Figura 51.- Esquema eléctrico del microcontrolador BX-24

Este sistema se ha utilizado en los ensayos definitivos, debido a su pequeño tamaño, bajo consumo, facilidad de programación, y porque es posible implementarlo en la placa de control y, posteriormente, en el inclinando.

4.3.2.2. Sistema LCDX

Este sistema está basado en el microprocesador BX-35, y viene ya integrado con un display LCD de 4 líneas de 20 caracteres y toda la circuitería necesaria para conectar periféricos como pulsadores, teclados, entradas analógicas y activar dispositivos como relés, lámparas, etc. El sistema incluye un puerto serie RS232 para conectarlo al PC tanto para comunicarse con este, como para descargar los programas.

Cuenta con 14 pines de entrada/salida más 8 salidas de potencia capaz de activar 8 relés, un puerto serie bidireccional un zumbador y 4 entradas TTL. Además tiene 8 entradas analógicas que pueden configurarse como entradas digitales normales, como entradas de tensión de 0 a 5V, o de 0 a 10V, como entrada de resistencia de 0 a 10K Ω y como entradas de intensidad de 0 - 20 mA. Además es capaz de leer un teclado matricial de 4x4 teclas por lo que se obtiene una completa interfaz humana con teclado y pantalla que se puede programar fácilmente en BasicX. En la figura 52 se muestra este microcontrolador.

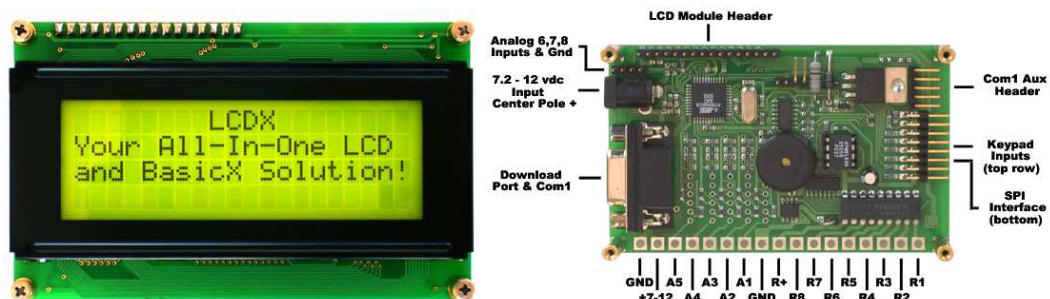


Figura 52.- Microcontrolador LCDX

Se usó principalmente en las primeras fases del desarrollo, ya que su display permite analizar de forma sencilla los datos de los sensores a fin de programar los ángulos, y que su conexionado es más cómodo. Sin embargo, carece del número suficiente de puertos analógicos para los sensores, ya que se requieren al menos seis y sólo dispone de 5. Además, este dispositivo tiene mayor tamaño y consumo que el descrito anteriormente y su integración en el inclinando plantea mayor dificultad. En la figura 53 se puede comprobar el tamaño de este dispositivo.

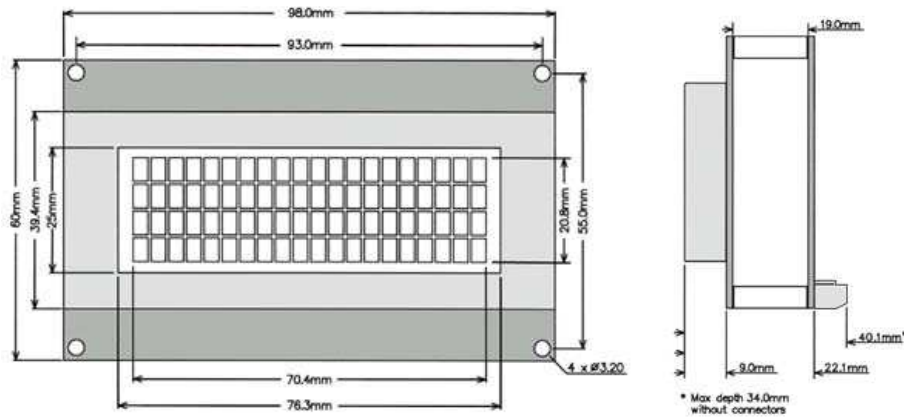


Figura 53.- Dimensiones del microcontrolador LCDX

4.3.2.3. Placa de control Mini Atom Board S310162

El Mini Atom, fabricado por Lynxmotion, es un circuito de control que puede utilizar varios tipos de microprocesadores, entre los que figura el BX-24. El circuito proporciona la interfaz de conexión al PC, así como numerosas conexiones para, sensores, servos, pulsadores, alimentación, etc. Permite la alimentación independiente para los servos y para la lógica. Incluye Bus de entrada salida en bloques de 4 puertos con alimentación y tierra que facilitan la conexión de diferentes dispositivos. En la figura 54 se muestra esta placa y en la figura 55 se muestra su circuito de control

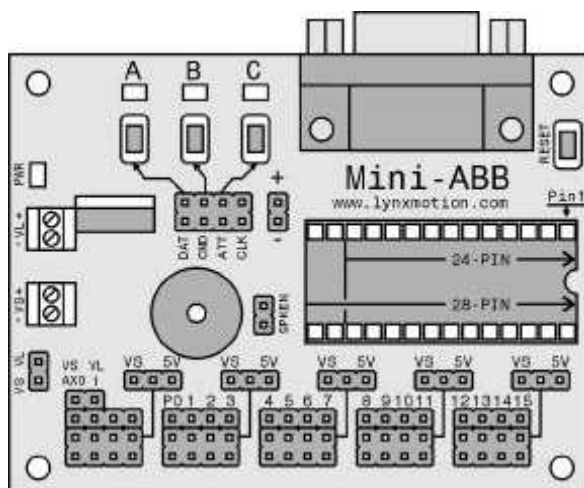


Figura 54.- Placa de control Mini Atom Board S310162

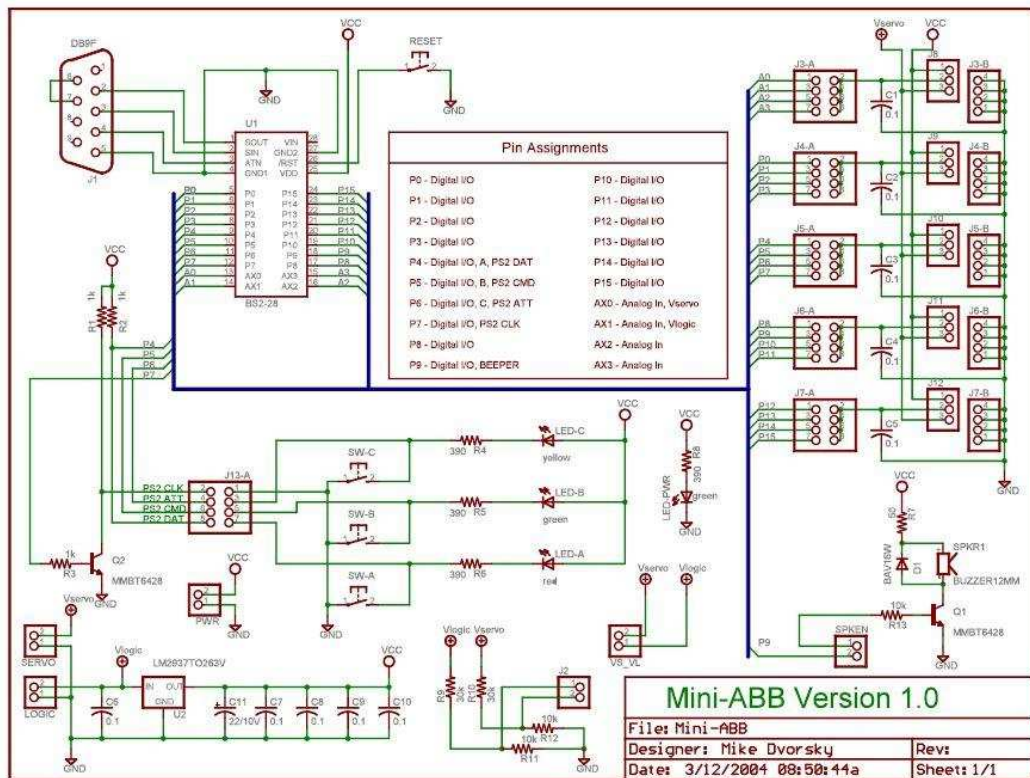


Figura 55.- Circuito de la placa de control Mini Atom Board S310162

Esta placa está adaptada a este microprocesador y facilita las conexiones con el resto de los periféricos y sensores, además de disponer de una entrada RS-232 que facilita su conexión con el ordenador para su programación. Su tamaño es reducido lo que ha permitido integrarlo en el inclimando.

Sus características técnicas son

- 3 Leds luminosos (amarillo, rojo, verde) y tres pulsadores integrados, asociados a tres puertos I/O.
- Regulador de tensión a 5 VDC, para lo cual la tensión de entrada tiene que ser de 5.5 a 9 VDC.
- Entrada de tensión independiente para los actuadores, pero que también se puede puentear a discreción.
- 20 conectores, asociados a las patillas del microprocesador, lo que permite su interconexión con los sensores.

4.3.3. Sistema de indicadores y actuadores

Una vez descritos los elementos encargados de la adquisición de datos y su interpretación, es necesario seleccionar los sistemas de señalización y alarma, y el de activación del inflador del airbag.

4.3.3.1. Indicadores de operatividad y alarma

Se ha optado por la utilización de leds luminosos de diferentes colores, y cuya combinación representa las distintas situaciones de operatividad, alerta y activación. Los leds luminosos tienen unas limitaciones impuestas en lo relativo a la tensión e intensidad a la cual están sometidos, por lo que es necesario el poner una resistencia en serie de un valor variable, en función del tipo de led, así como de la tensión de funcionamiento.

La placa mini ABB dispone de un selector de tensión de funcionamiento para los dispositivos auxiliares, en las que se puede elegir entre alimentarlos a la tensión interna de 5 V, o bien de la tensión de servicio que es de 12V, por lo que se muestra en la figura 56 la relación de resistencias a colocar en función del tipo de led y de tensión aplicada.

Alimentación: 12V			
tipo de led	Vled	corriente	resistencia
 azul / blanco alta luminosidad	3,7V	20 mA	(calculado: 415 ohm)  390 ohm
 rojo alta luminosidad	1,2V	20 mA	(calculado: 540 ohm)  560 ohm
 rojo tipo indicatore	1,2V	5 mA	(calculado: 2160 ohm)  2200 ohm
 verde / amarillo tipo indicatore	1,6V	5 mA	(calculado: 2080 ohm)  2200 ohm

Alimentación: 5V			
tipo de led	Vled	corriente	resistencia
 azul / blanco alta luminosidad	3,7V	20 mA	(calculado: 65 ohm)  68 ohm
 rojo alta luminosidad	1,2V	20 mA	(calculado: 190 ohm)  180 ohm
 rojo tipo indicatore	1,2V	5 mA	(calculado: 760 ohm)  680 ohm
 verde / amarillo tipo indicatore	1,6V	5 mA	(calculado: 680 ohm)  680 ohm

Figura 56.- Tabla de resistencias a utilizar para protección de led

También se ha incorporado un zumbador, mostrado en la figura 57, para obtener una alarma acústica que avise al tractorista del peligro de vuelco sin necesidad de que éste mire la consola de control. Este indicador acústico es compatible con cualquiera de las tensiones de trabajo utilizables y tiene las siguientes características técnicas:

- Alta sonoridad: 4.100 hz
- Tensión nominal: 2 a 30 VDC
- Intensidad nominal: menos de 20 mA.
- Nivel acústico: 80 - 100 dB a 30 cm



Figura 57.- Zumbador

4.3.4. [Activación del sistema](#)

4.3.4.1. [Activación del inflador de airbag](#)

El funcionamiento instantáneo del inflador de airbag requiere una tensión de al menos 12 V con una intensidad determinada, como la que tienen los vehículos automóviles. Debido a que la fuente interna de que utilizamos tiene proporciona una tensión de 5V, y que si bien se puede conectar para una tensión mayor, la intensidad es elevada para este microcontrolador, el funcionamiento instantáneo no estaría garantizado por lo que se ha incluido en la salida un relé de alta velocidad (figura 58), de la serie A de Fujitsu, que funciona con una tensión de 5V y es ligero y rápido.



Figura 58.- Relé de alta velocidad de Fujitsu

Las características técnicas del relé son:

- Peso: 1,2 g
- Tiempo de activación: 6 ms (máx.)
- V activación: 3,75 V
- Temperatura de trabajo: -40°C a 85°C
- Intensidad de trabajo: 2 A
- Tensión máxima trabajo: 110 VDC

4.3.4.2. Activación de los sistemas auxiliares de localización y aviso

Se ha considerado la posibilidad de asociar un sistema GPS con llamada automática a un centro de emergencia. Este sistema ya se está desarrollando en Europa y está asociado a los automóviles, denominado proyecto E-Call, con lo que en caso de activarse el E2D-ROPS, avisaría al teléfono de emergencias (112), proporcionando la localización exacta y facilitando la llegada de los servicios de emergencia. En la figura 59 se muestra el esquema de actuación del sistema de localización y aviso asociado al sistema de activación.

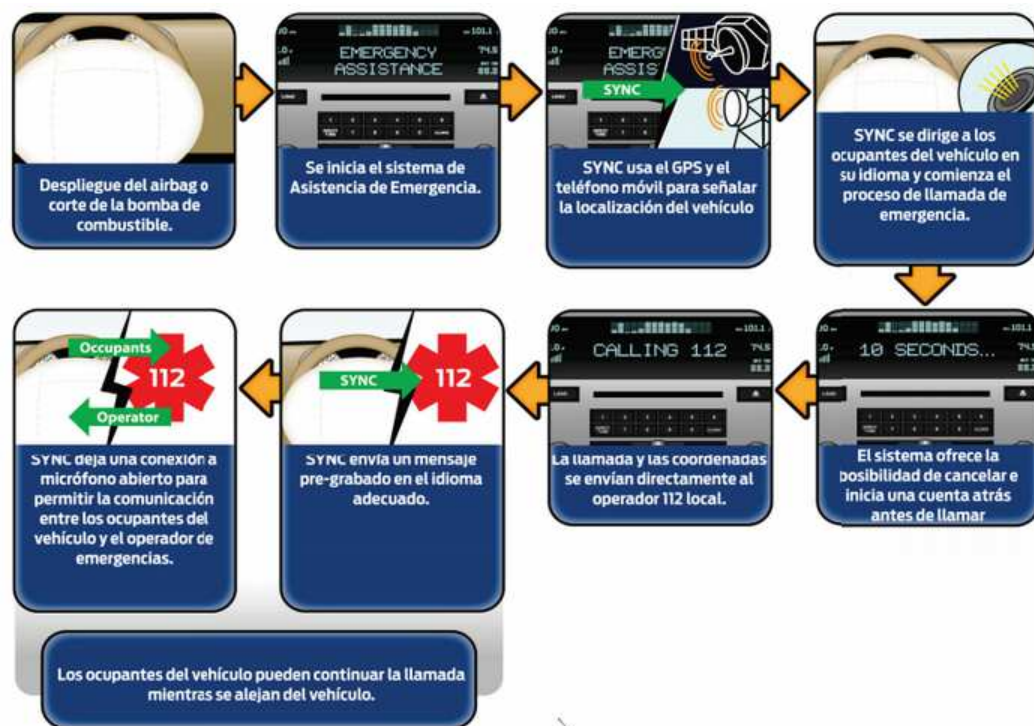


Figura 59.- Esquema de localización y aviso asociado al sistema de activación

Se ha dispuesto una salida para una futura conexión con este sistema el cual ya se está desarrollando, de tal manera que a su vez pueda asociar con el teléfono móvil, si bien ya sería objeto de otro proyecto.

5. RESULTADOS Y DISCUSION

5.1. Fabricación del E2D-ROPS

5.1.1. Elección de las dimensiones del E2D-ROPS.

Se ha utilizado software “vuelco.xls” para realizar el cálculo de la altura mínima que debe tener el E2D-ROPS, en posición desplegada, para asegurar que el tractor no sufra rodadura continua. Como esta altura mínima depende de la anchura superior de la estructura, en su posición operativa, se ha calculado esta altura para los diferentes valores de la citada anchura. Estos datos están recogidos en la tabla 8, siendo el modelo A el tractor John Deere 60C y el modelo B el tractor Kubota M8200D

Anchura (mm)		Altura total tractor (mm)		Reducción altura (mm)	
Tractor A	Tractor B	Tractor A	Tractor B	Tractor A	Tractor B
860	860	2100	2242	--	--
960	1060	2000	2194	100	48
1060	1160	1990	2169	110	73
1160	1260	1980	2140	120	102
1260	1398	1970	2100	130	142
1398	1500	1940	2060	160	182

Tabla 8.- Alturas mínimas necesarias que impiden la rodadura continua en función de la anchura superior del E2D-ROPS (la solución seleccionada se marca en negrita)

Observamos que a mayor amplitud de ROPS, mayor es la reducción de la altura, por lo que analizamos el comportamiento del E2D-ROPS en su diseño.

Para el tractor John Deere (A) el valor más alto considerado para su anchura fue de 1.398 mm, ya que el Código 6 establece que la suma de los anchos de vía ($S = 1.070$ mm) y de los neumáticos ($B0 = 330$) debe ser mayor que el ancho ($B6$) de la estructura de protección. Seleccionando esta altura, es posible disminuir la altura del E2D-ROPS a 1.940 mm. Sin embargo, esta altura no sería admisible, ya que la ROPS invadiría la zona libre, incluso antes de que ocurra el vuelco. Por ello, se ha tomado como una altura aceptable la de 2.000 mm, para el E2D-ROPS, que es 100 mm menor que la de la ROPS original.

De acuerdo con los criterios de evitar la rodadura continua, se podría diseñar una ROPS de 960 mm de ancho en su posición de funcionamiento, sin embargo, se ha optado por incrementar la anchura y disminuir la altura ya que además permite una mayor deformación máxima admisible antes de invadir la zona de seguridad.

Asimismo, para el tractor B es posible aumentar la ROPS hasta un ancho de 1.560, de acuerdo con el Código 6, pero esto llevaría al E2D-ROPS a ser demasiado rígido, por lo que se ha optado por una anchura similar a la del modelo A, con una altura de 2.100 mm

5.1.2. Selección de la sección de los tubos del E2D-ROPS.

Para estimar las secciones necesarias mínimas de los tubos para construir el E2D-ROPS, se ha utilizado el programa “*dasterema.xls*” (Arana et al., 2008), y para seleccionar el dimensionamiento más adecuado, se analizaron seis secciones circulares con el programa informático ANSYS Workbench.

Se analizó para cada una de estos modelos de E2D-ROPS, en función de la secuencia de pruebas del Código 6, la deformación y la tensión producidas al aplicar las fuerzas.

El modelo matemático fue validado usando los resultados del tractor Kubota. La figura 60 muestra las curvas de fuerza-deformación usando tanto el programa ANSYS como los ensayos reales. Se observa que el modelo matemático es coherente porque ambas curvas superpuestas son similares. Por tanto, es posible predecir los resultados de la secuencia de test para determinar la sección mínima de la estructura que produzca un resultado positivo en el test

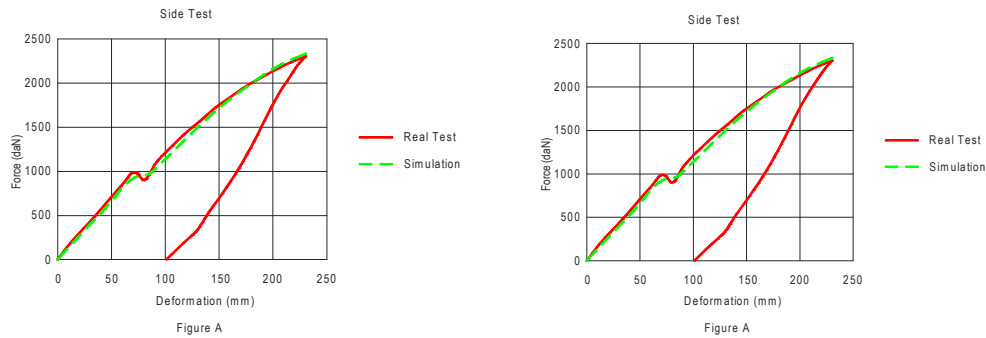


Figura 60.- Curvas de fuerza-deformación reales y simuladas de las pruebas de carga: (a) lateral; (b) trasera

5.1.2.1. Análisis para el tractor John Deere

La masa en vacío (M_v) de tractor John Deere 60 C es 1.845 kg y la masa máxima autorizada (M_{\max}) es 3.050 kg, inferior a 1,75 M_v . Por lo tanto, la masa de referencia mínima que se puede utilizar en la prueba de Código 6 para el John Deere 60 C es 1.845 kg y la energía que tiene que ser absorbida por el ROPS antes de la detención del ensayo lateral, por lo general el crítico, es 3.229 J, de acuerdo con el Código de 6, y para la detención del ensayo trasero la energía es de 1.422,5 J.

La tabla 9 muestra la deformación producida en el E2D-ROPS cuando ha sido construida con secciones circulares de diámetros de 60 x 50 mm y 45 x 35 mm, así como las energías totales que son absorbidas hasta que se alcanza un determinado valor de la fuerza aplicada, tanto en el ensayo lateral como en el trasero.

Ensayo lateral				Ensayo trasero			
F (N)	D (mm)	E (J)	Estrés (MPa)	F (N)	D (mm)	E (J)	Estrés (MPa)
8.500	53,5	254,6	306,42	6.000	119,0	437,07	311,50
11.000	191,1	1.629,3	377,93	6.700	215,1	1.050,60	335,33
11.125	204,0	1.771,7	381,91	6.975	275,2	1.461,26	345,86
11.400	231,5	2.082,4	390,66	7.050	293,3	1.588,81	350,68
12.860	420,8	4.388,0	422,46	7.085	302,1	1.650,58	352,95
13.000	444,7	4.697,2	425,61	7.100	305,9	1.677,39	353,93

Tabla 9.- Deformaciones, energía total absorbida y estrés calculados en los ensayos lateral y trasero, correspondientes a los ensayos realizados en el E2D-ROPS, con secciones de diámetros 60 mm, 50 mm, 45 mm y 35 mm.

Las deformaciones máximas admisibles para los ensayos lateral y trasero, mostrados en las figuras 61(a) y 61(b), son 479 y 305 mm, respectivamente. La figura 61(b) muestra que el ángulo producido en las vigas durante la prueba trasera es $11,2^\circ$ y que es necesario incluir un pequeño arco detrás del asiento lo suficientemente resistente para ser considerado como un punto duro, tal como se define en el Código 6.

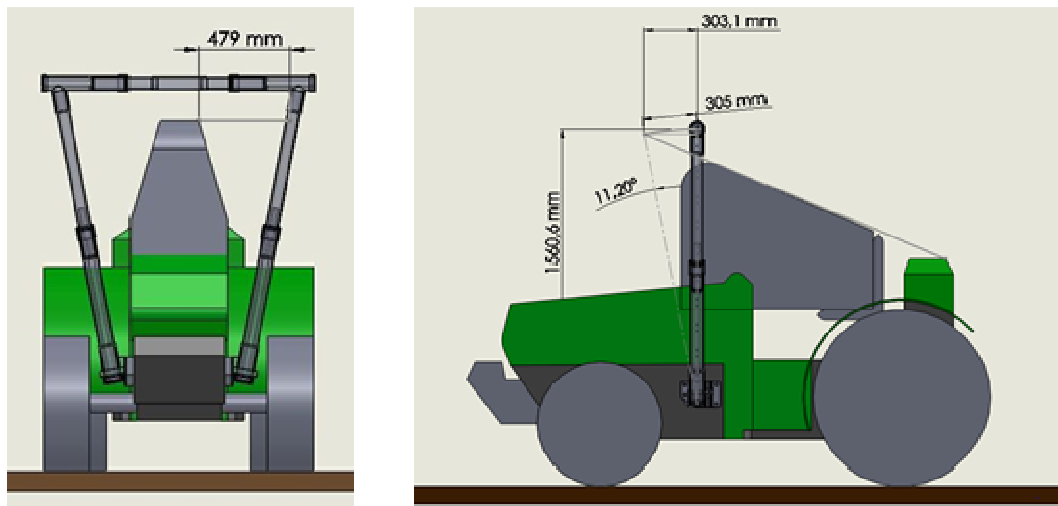


Figura 61.- Deformaciones máximas admisibles con el E2D-ROPS montado en el tractor John Deere: (a) ensayo lateral; (b) ensayo trasero

A partir de los datos mostrados en la tabla 9, teniendo en cuenta los valores máximos de deformación tanto en los ensayos lateral como trasero, y utilizando un coeficiente de seguridad de 0,85 para la resistencia a la tracción máxima (tensión máxima admisible de 425 MPa), es posible comprobar que el E2D-ROPS sería capaz de obtener un resultado positivo en los ensayos del Código 6, usando para ello una masa de referencia de 2.301 kg. Esta masa de referencia corresponde a un valor total de energía absorbida durante el ensayo trasero de 1.650 J. En este punto el valor de la fuerza llega a 7.100 N y la deformación producida es de 302,1 mm. El margen de seguridad proporcionado por el E2D-ROPS sería del 25 %.

Es posible demostrar que, utilizando el E2D-ROPS, el ensayo crítico es el trasero, a diferencia de una ROPS normal, ya que el aumento de la anchura ha permitido aumentar la deformación máxima admisible durante el ensayo lateral. Este valor de la masa de referencia permitiría a los fabricantes establecer una masa máxima admisible, de acuerdo con los criterios de seguridad en caso de vuelco, obteniéndose un valor de 4.027 kg.

Las tablas 10 y 11 muestran las deformaciones y tensiones producidas en los E2D-ROPS diseñados en el momento en que la energía total absorbida por el mismo alcanza los valores requeridos por el código 6 para los ensayos lateral y trasero, tal y como se definen en el Código 6.

JOHN DEERE	Deformación máxima admisible durante el ensayo lateral = 479 mm							
	Tensión máxima admisible = 425 MPa							
	M = 1000 kg		M = 1845 kg		M = 2500 kg		M = 5000 kg	
ROPS	Def (mm)	Tens (MPa)	Def (mm)	Tens (MPa)	Def (mm)	Tens (MPa)	Def (mm)	Tens (MPa)
Original	-	-	363.5	370.39	-	-	-	-
90x80; 75x65	-	-	143.7	396.93	181.0	412.23	313.6	438.79
80x70; 65x55	-	-	191.7	371.96	246.4	391.05	425.2	424.71
75x65; 60x50	-	-	211.0	397.48	267.8	413.43	-	> 425
70x60; 55x45	148.6	363.32	235.6	398.25	302.5	414.87	-	> 425
60x50; 45x35	204.0	381.91	331.1	410.73	420.8	422.46	-	> 425
55x45; 40x30	251.2	382.70	425.8	411.77	-	> 425	-	> 425

Tabla 10.- Máximas deformaciones y tensiones calculadas en diferentes E2D-ROPS para el ensayo lateral, variando las dimensiones de la estructura, así como de la masa de referencia.

JOHN DEERE	Deformación máxima admisible durante el ensayo trasero = 305 mm							
	Tensión máxima admisible = 425 MPa							
	M = 1000 kg		M = 1845 kg		M = 2500 kg		M = 5000 kg	
ROPS	Def (mm)	Tens (MPa)	Def (mm)	Tens (MPa)	Def (mm)	Tens (MPa)	Def (mm)	Tens (MPa)
Original	-	-	243.4	439.94	-	-	-	-
90x80; 75x65	-	-	135.7	340.63	215.5	374.42	215.5	374.42
80x70; 65x55	-	-	155.0	330.37	174.1	337.10	259.4	365.39
75x65; 60x50	-	-	176.9	378.03	212.4	393.68	>305	420.50
70x60; 55x45	157.7	347.04	198.9	366.85	235.6	378.53	>305	> 425
60x50; 45x35	215.1	335.33	275.2	345.86	>305	-	>305	> 425
55x45; 40x30	262.7	369.95	>305	-	>305	-	>305	> 425

Tabla 11.- Máximas deformaciones y tensiones calculadas en diferentes E2D-ROPS para el ensayo trasero, variando las dimensiones de la estructura, así como de la masa de referencia.

Estos datos han sido calculados utilizando el programa informático de elementos finitos, y en la tabla se muestran las diferentes secciones de la viga del E2D-ROPS así como diferentes masas de referencia.

Se observa que existe un incremento en la seguridad proporcionada por el E2D-ROPS ya que el esfuerzo máximo que se observa en la tabla es de 439,94 MPa correspondiente a la tensión alcanzada por el ROPS original del tractor, y utilizando su masa en vacío como masa de referencia, siendo este valor cercano a la máxima resistencia a la tracción, y supera al valor de la resistencia máxima admisible, según los criterios establecidos en esta tesis.

Observamos que la sección mínima admisible para los tubos sería la configuración de 60 x 50 mm y 45 x 35 mm, que es mucho menor que la estructura ROPS original, por lo que el peso se reduce. Además, como el aumento de la anchura del E2D-ROPS produce un aumento de la deformación máxima admisible en la prueba de carga lateral, implica una disminución de la energía total en este ensayo, por lo que esta prueba se vuelve menos probable de ser crítica respecto a la evaluación total de las pruebas según el Código 6.

El ensayo trasero en el E2D-ROPS fabricado con la sección antes citada, produciría una deformación de 275,2 mm, la cual es mayor que la calculada para el ROPS original (243.4 mm), así como una tensión de 345,86 MPa, menor que el calculado para el ROPS original. Por lo tanto, se deduce que el E2D-ROPS muestra un comportamiento más plástico que el arco original.

Los resultados de las tablas 10 y 11, muestran que es posible fabricar un E2D-ROPS que en su forma desplegada tenga 2.000 mm de alto y 1.398 mm de ancho, y cuyas secciones circulares tengan unos diámetros de 70 x 60 y 55 x 45 mm, para los tubos hembra y macho, respectivamente, capaces de obtener un resultado positivo de los ensayos del Código 6, utilizando una masa de referencia de 2500 kg, la cual es superior a la del diseño original.

Usando el software de Elementos Finitos y el procedimiento MARMO (Alfaro et al., 2010) se ha podido comprobar que este E2D-ROPS podría obtener un resultado positivo de los ensayos del Código 6, utilizando una masa de referencia de hasta 3.298 kg. Con este valor, el E2D-ROPS podrían colapsar durante el ensayo lateral debido a una tensión excesiva en sus secciones críticas.

Usando un E2D-ROPS con secciones de diámetros de 75 x 65 y 60 x 50 mm, se podría obtener un resultado positivo de los ensayos del Código 6 con una masa de referencia de 3.537 kg, siendo este valor un poco más alto que el límite superior del campo de aplicación del Código 6. Si usáramos en este caso una masa de referencia superior, la tensión en los tramos críticos de las vigas, durante el ensayo lateral, superaría los 425 MPa y no cumpliría los criterios establecidos en esta tesis.

La tabla 12 muestra las deformaciones producidas en la estructura antivuelco que tienen secciones circulares con diámetros de 80 x 70 y 65 x 55 mm, así como las energías totales que son absorbidas por la misma en función del valor de la fuerza aplicada, durante los ensayos de carga lateral y trasera.

Ensayo lateral				Ensayo trasero			
F (N)	D (mm)	E (J)	Tensión (MPa)	F (N)	D (mm)	E (J)	Tensión (MPa)
21,700	191.7	3231.9	371.96	13,000	122.3	1067.33	350.92
22,100	209.7	3626.6	378.19	13,600	155.0	1502.57	330.37
22,850	246.4	4452.5	391.05	13,750	164.3	1630.02	333.65
25,500	420.9	8682.2	424.14	13,900	174.1	1764.68	337.10
25,550	425.2	8792.4	424.71	15,000	259.4	2999.84	365.39
25,600	429.6	8904.2	425.29	15,475	302.7	3658.71	374.85

Tabla 12.- Deformaciones, energía absorbida y tensiones, calculadas en los ensayos de carga lateral y trasera, para una E2D-ROPS de dimensiones 80 x 70 y 65 x 55 mm

Una extrapolación más allá del límite superior del campo de aplicación del Código de 6 probaría que el valor de la energía que se podría alcanzar antes de detener el ensayo lateral, con una masa de referencia de 5.000 kg, es 8.750 J (según el Código 6) y este valor sería de 3.000 J para el ensayo trasero.

La tabla anterior muestra que estos valores son soportados, durante las pruebas correspondientes, antes de llegar a la deformación máxima admisible correspondiente y a los valores máximos admisibles de tensión.

Teóricamente, la energía total absorbida por el E2D-ROPS antes de alcanzar el valor de la tensión límite es de 8.904 J, de acuerdo a la tabla 12, que corresponde a una masa de referencia de 5.088 kg.

Es interesante destacar que, utilizando el E2D-ROPS y esta masa de referencia, el ensayo crítico es el lateral, incluso con un incremento sustancial de la deformación máxima admisible. Esto se debe a que ha sido posible diseñar un E2D-ROPS muy deformable capaz de permitir una gran deformación con una baja tensión durante el ensayo trasero. Sin embargo, una deformación superior a 425 mm durante el ensayo lateral, aunque es inferior a la admisible, necesitaría una fuerza de más de 25.550 N, que produce una tensión superior a los 425 MPa.

La tabla 12 muestra que un E2D-ROPS fabricado utilizando secciones mayores en los tubos, no podría obtener un resultado positivo de estas pruebas debido a que sería demasiado rígido y tendría peor capacidad de absorción de energía. Durante el ensayo lateral, alcanzaría un valor de tensión superior a 425 MPa y podría colapsar antes de alcanzar el valor de la energía absorbida requerido por el Código 6 considerando una masa de referencia de 5.000 kg.

Por esta razón, se tomó la decisión de fabricar el E2D-ROPS con tubos de diámetros de 80 x 70 y 65 x 55 mm para los tubos exterior e interior.

5.1.2.2. *Análisis para el tractor Kubota*

Para el tractor modelo Kubota M8200D, las deformaciones máximas admisibles durante los ensayos de carga lateral y trasera se muestran en la figura 62, siguiendo la misma metodología que para el tractor anterior

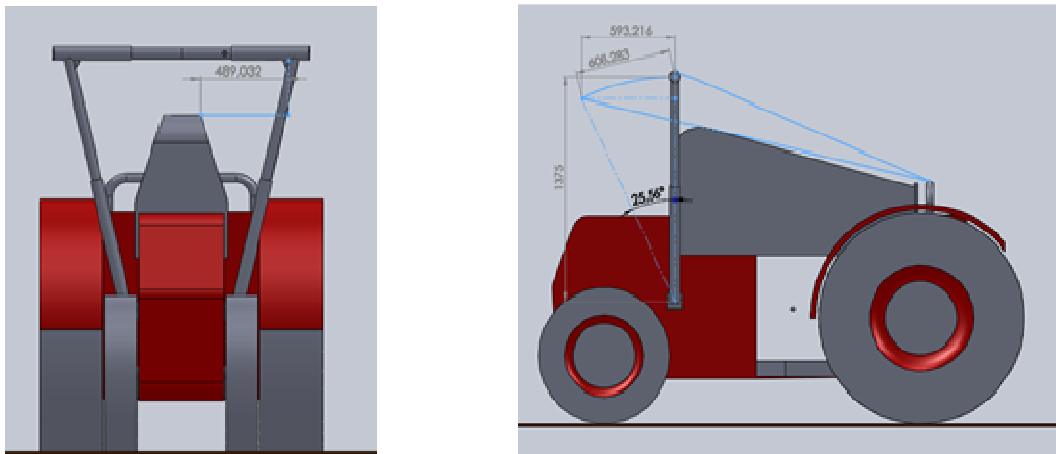


Figura 62.- Deformaciones máximas admisibles con el E2D-ROPS montado en el tractor Kubota: (a) ensayo lateral; (b) ensayo trasero

Las tablas 13 y 14 muestran las deformaciones y tensiones producidas en el E2D-ROPS durante los ensayos lateral y trasero.

KUBOTA	Deformación máxima admisible durante el ensayo lateral = 489 mm Tensión máxima admisible = 425 MPa							
	M = 1000 kg		M = 2050 kg		M = 2500 kg		M = 5000 kg	
ROPS	Def (mm)	Tens (MPa)	Def (mm)	Tens (MPa)	Def (mm)	Tens (MPa)	Def (mm)	Tens (MPa)
90x80; 75x65	-	-	155.52	410.87	182.47	18.,25	-	-
80x70; 65x55	-	-	192.12	409.36	218.05	414.41	-	-
75x65; 60x50	-	-	228.74	420.86	241.95	423.15	-	-
70x60; 55x45	134.79	386.79	236.94	416.47	274.71	423.38	-	-
60x50; 45x35	184.29	395.62	324.06	424.86	-	-	-	-
55x45; 40x30	227.63	387.76	400.73	422.36	-	-	-	-

Tabla 13.- Máximas deformaciones y tensiones calculadas en diferentes E2D-ROPS para el ensayo lateral, variando las dimensiones de la estructura, así como de la masa de referencia.

KUBOTA	Deformación máxima admisible durante el ensayo trasero = 608 mm Tensión máxima admisible = 425 MPa							
	M = 1000 kg		M = 2050 kg		M = 2500 kg		M = 5000 kg	
ROPS	Def (mm)	Tens (MPa)	Def (mm)	Tens (MPa)	Def (mm)	Tens (MPa)	Def (mm)	Tens (MPa)
90x80; 75x65	-	-	127.4	346.14	148.9	357.86	-	-
80x70; 65x55	-	-	147.2	349.04	186.6	368.24	-	-
75x65; 60x50	-	-	156.1	364.33	191.9	378.13	-	-
70x60; 55x45	139.6	352.54	185.5	375.01	208.9	383.12	-	-
60x50; 45x35	190.7	374.15	260.3	394.61	-	-	-	-
55x45; 40x30	22.51	375.25	318.7	399.68	-	-	-	-

Tabla 14.- Máximas deformaciones y tensiones calculadas en diferentes E2D-ROPS para el ensayo lateral, variando las dimensiones de la estructura, así como de la masa de referencia.

Estos valores se han calculado mediante el programa de elementos finitos ANSYS, aplicando distintas alternativas en lo referente al tamaño de los tubos de los E2D-ROPS y de diferentes masas de referencia.

Gracias a estas tablas se puede observar los valores máximos admisibles que conducen a un resultado positivo de las pruebas, así como las secciones mínimas admisibles para la fabricación del E2D-ROPS en función de la masa de referencia.

Es posible demostrar que un E2D-ROPS que en la posición desplegada tenga unas dimensiones de 2100 mm de alto y 1398 mm de ancho, con secciones circulares de diámetros 55 x 45 y 40 x 30 mm, es capaz de obtener un resultado positivo para los ensayos del Código 6, utilizando una masa de referencia de 2.050 kg, que es la masa en vacío de este tractor.

Usando el procedimiento MARMO (Alfaro et al., 2010), es posible comprobar que el valor máximo de la masa de referencia que permitiría un resultado positivo de los ensayos del Código 6 es 2.251 kg. El margen de seguridad para este E2D-ROPS sería de un 10 % y la masa máxima admisible sería de 3.939 kg. Usando una masa de referencia de 2.252 kg, la tensión producida durante la prueba de las partes podía hacer colapsar el E2D-ROPS.

Para asegurar un resultado positivo de los ensayos del Código 6, utilizando una masa de referencia de 2.500 kg, los E2D-ROPS deben ser construidos con perfiles de 70 x 60 y 55 x 45 mm. Sin embargo, si se usan secciones de 75 x 65 y 60 x 50 mm, el valor máximo de la masa de referencia es de sólo 2631 kg.

Esto se debe a que el E2D-ROPS se rigidiza en exceso, permite deformaciones pequeñas, produce mayores tensiones y puede colapsar. Por esta razón, se ha elegido un tamaño que optimice tanto la deformación como la tensión, ya que una mayor deformación no incrementaría la seguridad puesto que el fallo del ensayo sería producido por un exceso de tensión.

5.1.2.3. *Diseño de los tubos telescópicos para la construcción del E2D-ROPS*

Utilizando el programa informático de elementos finitos, se calcularon las tensiones producidas en las diferentes partes de la estructura ROPS, durante los ensayos del Código 6

Gracias a estas simulaciones fue posible demostrar que las tensiones máximas se producen en las partes exteriores de la viga transversal y en las partes inferiores de las vigas inclinadas. Con el fin de minimizar la tensión, el E2D-ROPS fue diseñado con los tubos hembra en las partes exteriores de la viga transversal y en las partes inferiores de las vigas inclinadas.

5.1.2.4. *Diseño del sistema de bloqueo*

Para garantizar que cuando el E2D-ROPS se despliegue, en caso de vuelco, se quede en una posición fija, se ha diseñado un sistema de bloqueo de cuatro puntos, como el mostrado en la figura 63

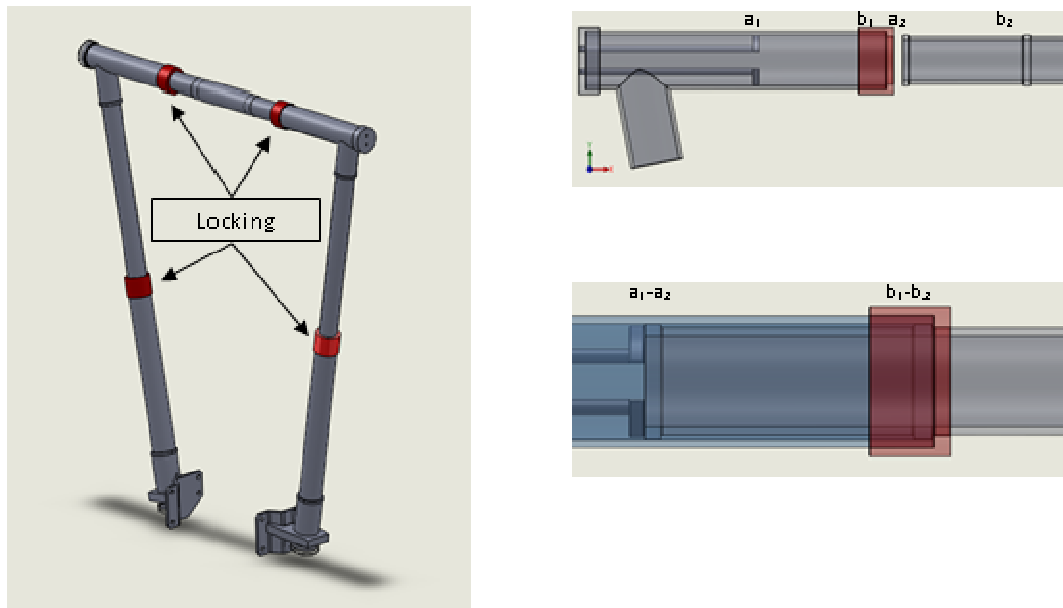


Figura 63.- Localización de los puntos de bloqueo en el E2D-ROPS en la posición operativa: (a) situación de los puntos de bloqueo; (b) visualización del sistema desensamblado para observar las piezas; (c) sistema de bloqueo cerrado.

Cada uno de estos cuatro elementos de bloqueo comprende dos varillas paralelas, soldadas a los extremos de las bases de los tubos hembra dentro de los cuales están alojados. Estas varillas tienen en sus extremos libres unos semicírculos de 10 mm de espesor, con un radio de 54 mm, de modo que el borde semicircular de esta pieza se adapta perfectamente a las paredes interiores del tubo macho durante la mayor parte del desplazamiento, separándose estos cilindros hasta las paredes interiores del tubo hembra una vez alcanzado el máximo desplazamiento, que es la posición operativa del E2D-ROPS.

Estas barras están diseñadas para que sus semicírculos finales tiendan a separarse, pero es posible, con un esfuerzo moderado, colocar estas varillas dentro de los tubos. En la posición plegada (baja y estrecha), las varillas permanecen dentro del tubo macho, insertado dentro del tubo hembra (figura 64a).

Cuando los sistemas de propulsión actúan sobre la sección transversal de los tubos desplegable, éstos se mueven rápidamente hacia el exterior en la parte superior y hacia arriba en las vigas inclinadas. En la viga transversal, el tubo hembra se desplaza hacia el exterior y ello hace que se desplacen las varillas soldadas que están en su interior, haciendo que sus semicírculos también se desplacen por el interior del tubo macho (figura 64b) hasta que alcanza su borde exterior, y en ese momento salgan fuera del tubo macho (figura 64c). El despliegue se detiene en este punto por medio de cuatro resaltes, uno de los cuales se muestra en la figura 63b y 63c (b1 - b2).

En este momento, los semicírculos se alejan el uno del otro hasta adaptarse a la pared interior del tubo hembra, con lo que el sistema se bloquea, (figura 64d). Los resaltes impiden el despliegue excesivo del E2D-ROPS, mientras que los semicírculos y el extremo del tubo macho (a1 - a2 en la figura 63) impiden que se retraiga de nuevo.

En las vigas inclinadas son los tubos machos los que se mueven hacia arriba, pero el sistema de bloqueo actúa de la misma manera. Por lo tanto el bloqueo se produce en la posición más alta y más ancha del E2D-ROPS.

En la base de la viga inclinada, se ha instalado una válvula de seguridad para eliminar el exceso de gas y de energía, una vez que el dispositivo está bloqueado. El sistema de bloqueo ha sido probado y es suficiente para superar los distintos ensayos del Código 6 con una masa de referencia equivalente a la masa en vacío del tractor John Deere 60C.

Modificando la resistencia de las barras del sistema de cierre, es posible aumentar la resistencia del conjunto, con lo que sería posible superar las pruebas del Código 6 utilizando mayores masas de referencia.

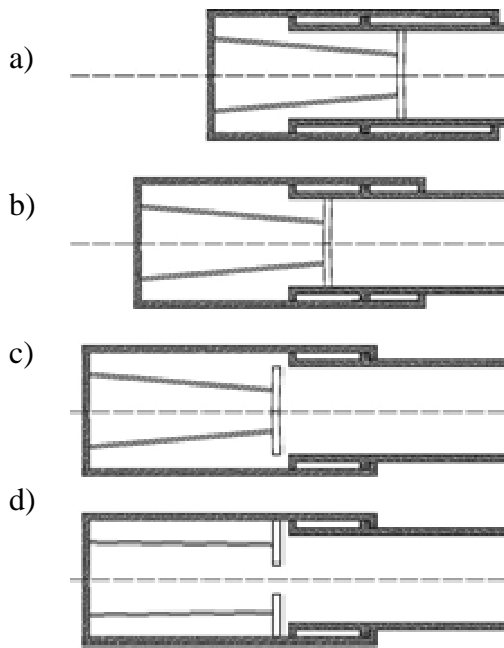


Figura 64.- Esquema de funcionamiento del sistema de bloqueo: (a) posición baja y estrecha; (b) posición intermedia; (c) fin del despliegue; (d) posición bloqueado.

5.2. Ensayos de despliegue del E2D-ROPS

En primer lugar, se comprobó que el dispositivo es fácil de desplegar manualmente, en altura y anchura.

5.2.1. Ensayos con aire comprimido

Para probar el dispositivo en la posición más favorable, la pieza que simulaba la fijación del dispositivo al tractor se atornilló a una pared de manera que el E2D-ROPS se colocó horizontal. En esta posición, el aire comprimido se introdujo en el dispositivo, en primer lugar, en los extremos inferiores de las vigas inclinadas y, posteriormente, en el centro de la viga transversal.

Para controlar la presión del aire introducido en el E2D-ROPS, se utilizó un compresor capaz de generar una presión de 1 MPa y una válvula de regulación de presión. También se coloca un manómetro entre el compresor y el E2D-ROPS, para introducir aire a diferentes presiones y verificar su comportamiento. Se comprobó que

cuando el aire se introducía a través de los extremos inferiores de las vigas inclinadas, la presión requerida para mover y bloquear el dispositivo fue de 0,6 MPa.

A continuación, el E2D-ROPS se colocó en posición vertical, que es una posición menos ventajosa que la real, pues en caso de vuelco el tractor estará inclinado. En esta posición, fue necesario introducir el aire a una presión de 0,9 MPa para desplegar el E2D-ROPS y se notó que hubo una fuga significativa de aire. Una vez que la mayor parte de las fugas fueron eliminados por medio de juntas tóricas, se probó de nuevo a una presión de 0,1 a 0,8 MPa.

Mediante la introducción de aire en los extremos de las vigas inclinadas, el E2D-ROPS logró que se desplegara con una presión de 0,3 MPa, pero fue necesario utilizar una presión de 0,4 MPa para llegar a la posición superior y bloquear el sistema en esta posición si bien de forma lenta.

Usando presiones más altas, el E2D-ROPS funcionó más rápido y mejor. Al introducir el aire en el centro de la viga transversal, fue necesaria una presión de 0,8 MPa para desplegarlo y bloquearlo en su posición operativa.

5.2.2. Ensayos realizados con infladores pirotécnicos para airbag

A partir de los resultados de las pruebas de aire comprimido, es posible establecer el flujo adecuado para el despliegue correcto del dispositivo y se observó que la presión mínima requerida es de 0,4 MPa. La necesidad de una presión de 0,8 MPa, al introducir el aire sólo en un punto en el centro de la viga transversal, no necesariamente prueba que se requiere una presión más alta en este caso, ya que este aumento podría ser debido a la necesidad de lograr un flujo suficiente de aire a través de una única entrada de aire. Por lo tanto, es necesario proporcionar una presión superior a 0,4 MPa. para el despliegue correcto del E2D-ROPS y este valor de la presión debe estar entre 0,4 y 0,8 MPa.

Los infladores comerciales se definen por sus curvas de presión-tiempo que muestran la presión proporcionada por el inflador en un cierto volumen, que por lo general es el volumen de la bolsa. Se eligieron para las pruebas varios airbag de la serie SHI2, fabricado por TRW Airbag System GmbH, tal y como se indicó en el punto 4.2.2, siendo sus curvas indicadas en la figura 42.

Se muestra que estos infladores son capaces de proporcionar presiones entre 0,122 y 0,42 MPa y ocupan un volumen normalizado de 28,3 l, en 50 ms. Teniendo en cuenta que el volumen interno de los E2D-Rops es 6,98 l, en su posición más baja, y 12,77 L, en su posición más alta, es posible establecer que la presión proporcionada por estos infladores en los volúmenes citados será de alrededor cuatro veces las presiones en 28,3 l, al principio de la implementación y del doble cuando se haya realizado el despliegue total, a pesar de estas presiones podrían disminuir en el caso de fugas.

A partir de las características de los distintos modelos de infladores, es posible seleccionar el más adecuado para proporcionar la presión citada. Como primera característica, está claro que debe ser tan pequeño como sea posible con el objeto de poder estar colocado en el interior del E2D-ROPS.

El inflador que proporciona la presión más baja es un SHI2-20 y entre los infladores que pertenecen a esta serie, con la ayuda de los técnicos de la Airbag System GmbH Compañía TRW, se eligió el modelo SHI2-20-614 que proporciona una presión de 0,11 MPa a una temperatura de 23° C.

La figura 65 muestra la curva de presión-tiempo de este inflador para diferentes temperaturas.

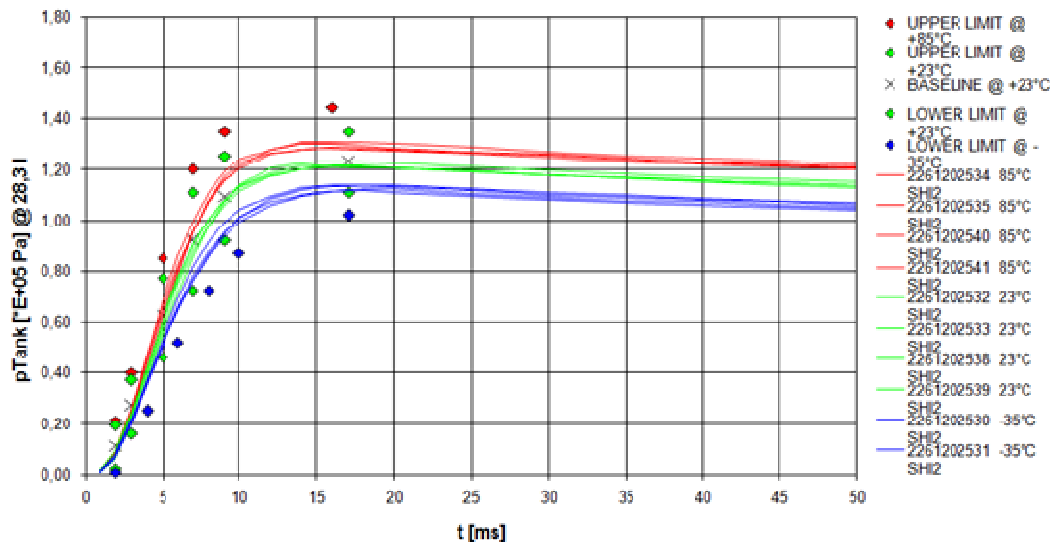


Figura 65.- Curvas de presión-tiempo del inflador SHI2-20-614, construido por TRW (cortesía de TRW)

Se realizaron dos ensayos, el primero usando dos infladores SHI2-20-614 colocados en las vigas inclinadas de los E2D-ROPS, y el segundo usando sólo un inflador SHI2-20-614 colocado en el centro de la viga transversal superior.

En el primer ensayo, el E2D-ROPS, con los dos infladores instalados en su interior, fue montado en el tractor John Deere y el tractor, asegurado por una cincha de seguridad, se inclinó lentamente. Un inclinando instalado en el mismo activó los infladores al llegar a 45°, utilizando para ello una corriente eléctrica de 3 A a 12 V. El proceso de activación y el despliegue de la E2D-ROPS fueron programados utilizando un temporizador digital de alta precisión y se grabó el despliegue utilizando para ello cámaras de vídeo. La figura 66 muestra el tractor inclinado, la fuente eléctrica y el temporizador durante las pruebas realizadas en el Campus de Tudela de la Universidad Pública de Navarra



Figura 66.- Ensayos de despliegue del E2D-ROPS instalado en el tractor

Al llegar a este ángulo, el inclinando, que es nuestro sistema de toma de decisión de la activación del despliegue de la AD-ROPS, activó los infladores y el gas desplegó el E2D-ROPS que se bloqueó en la parte superior operativa.

El tiempo total para la activación, despliegue y de bloqueo, medido por el cronómetro digital de alta precisión, fue de 102 ms, poco más de una décima de segundo. Se comprueba que el sistema funciona correctamente porque el E2D-ROPS pasa de forma apropiada de la posición replegada a la posición operativa desplegada en un tiempo inferior a cualquiera de los tiempos de despliegue de otros ROPS automáticamente desplegados como el AutoROPS (Powers et al., 2001), el mecanismo de anclaje de Silleli et al. (2007) o los que se utilizan en los coches descapotables. La figura xxx muestra el tractor justo antes y justo después del despliegue automático del E2D-ROPS en el tractor.

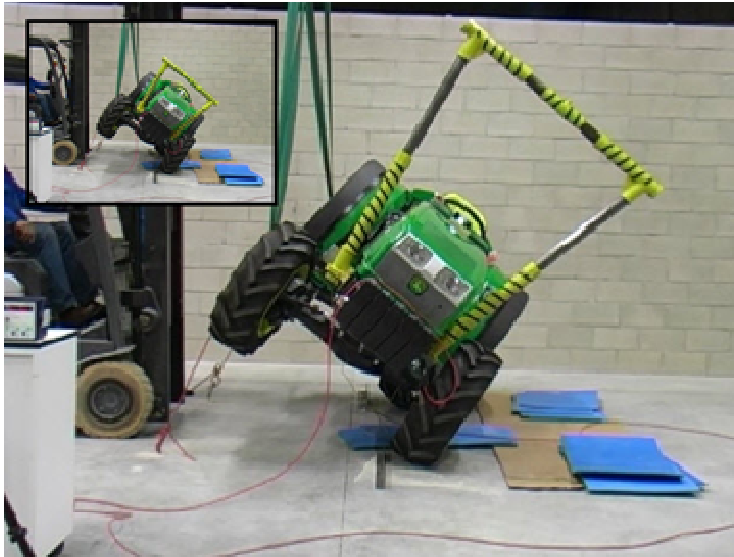


Figura 67.- Despliegue del E2D-ROPS al llegar al ángulo de activación

La escasa necesidad de tiempo para desplegar y bloquear el E2D-ROPS proporciona la ventaja de que el momento de activación se puede retrasar y es más fácil evitar cualquier activación no deseada y que ésta solo se produzca en situación de vuelco inminente de vuelco. Sin embargo, un despliegue más lento del dispositivo conduciría a una aceleración inferior de las vigas desplegadas que podría ser preferible.

Por esta razón, y para probar un sistema de despliegue usando sólo un inflador, se ha realizado una segunda prueba. El E2D-ROPS fue montado en una bancada de acero y se colocó un inflador SHI2-20-614 en el centro de la viga de despliegue transversal, activándose en este caso por medio de un interruptor, ya que el objetivo era analizar el tiempo de despliegue y su comportamiento. En este caso, se comprobó que el despliegue fue correcto y se bloqueó en un tiempo de 312 ms.

Por lo tanto, es posible instalar un solo inflador SHI1-20-614, ya que su tiempo de despliegue de 312 ms es inferior al tiempo de vuelco y es un valor similar al utilizado por los coches descapotables y al AutoROPS de NIOSH (Powers et al., 2001).

Está claro que variando el tamaño del inflador es posible seleccionar la velocidad de despliegue y un fabricante que comercializara el sistema E2D-ROPS podría elegir el inflador comercial que proporcione la velocidad de despliegue más adecuada, en cada caso.

5.3. Ensayos con los AD-ROPS

Además del E2D-ROPS, se realizaron pruebas y ensayos con los modelos de AD-ROPS proporcionados por la empresa AIR-ROPS NA 2012 S.L., los cuales han sido una variación del modelo original, pero en distintos tamaños y capacidades en función de la masa de referencia prevista para los vehículos en que podrían ser montadas, con el objeto de posibilitar un abanico de modelos que adecuen el tamaño de la AD-ROPS al del tractor en que pueden ser montados.

5.3.1. Selección del número, tamaño y ubicación de los infladores para desplegar las AD-ROPS.

Se han probado las tres AD-ROPS, atornillados a la bancada de acero usada para las pruebas, colocándose en posición vertical, y se verificó que con una presión de 0,8 MPa se desplegaban y se bloqueaban de forma correcta.

En una segunda fase se hicieron 9 ensayos utilizando distintas configuraciones, tal y como se ha indicado en el apartado 4, observándose en todos los casos que usando infladores, el despliegue y bloqueo de las AD-ROPS fue adecuado. Por tanto, se puede instalar la AD-ROPS en un tractor, utilizando cualquiera de las configuraciones probadas, aunque sería conveniente realizar ensayos para determinar las combinaciones AD-ROPS-inflador más adecuadas.

Los criterios para seleccionar el número, tamaño y localización de los infladores deben estar orientados a maximizar la fiabilidad del sistema y reducir al mínimo el tiempo de despliegue. La tabla 15 muestra el tiempo de despliegue de los ensayos realizados en el prototipo E2D-ROPS y los AD-ROPS A, B y C, utilizando los diferentes infladores de airbag en las diferentes configuraciones. Es posible comprobar que todos los tiempos de despliegue mostrados en esta tabla son menores que el tiempo de vuelco.

AD-ROPS	Ø exterior	Inflador	Nº	Localización	Tiempo
C	70 mm	SHI2-30V612	2	Viga inclinada	97 ms
E2D-ROPS	80 mm	SHI2-20V614	2	Viga inclinada	102 ms
C	70 mm	SHI2-20V614	2	Viga inclinada	108 ms
C	70 mm	SHI2-30V612	1	Viga transversal	183 ms
C	70 mm	SHI2-30V612	1	Viga inclinada derecha	195 ms
C	70 mm	SHI2-20V612	1	Viga inclinada derecha	280 ms
B	55 mm	SHI2-30V612	1	Viga transversal	198 ms
B	55 mm	SHI2-20V612	1	Viga transversal	224 ms
A	50 mm	SHI2-30V612	1	Viga transversal	156 ms
A	50 mm	SHI2-20V612	1	Viga transversal	175 ms
E2D-ROPS	80 mm	SHI2-20V614	1	Viga transversal	312 ms

Tabla 15.- Tiempos de despliegue usando distintas combinaciones de inflador y de AD-ROPS

La presión proporcionada por dos infladores debería duplicar teóricamente la presión proporcionada por un solo inflador según la ley de Boyle, o incluso un poco más alta porque la inclusión de un segundo inflador reduce el volumen interno de la AD-ROPS en su posición inferior. Por lo tanto, el tiempo de despliegue debería ser alrededor de un 30% inferior cuando se utilizan dos infladores en lugar de uno sólo, ya que al duplicar la presión se duplica la fuerza y la aceleración, lo que provocaría que el tiempo se redujera de forma proporcional a la raíz cuadrada de este valor, que es de aproximadamente 1,4142.

Sin embargo, los resultados de los ensayos realizados sobre la AD-ROPS C utilizando uno y dos infladores del modelo SHI2-30V612 muestran que la reducción fue del 47 %, cuando el inflador se coloca en la viga transversal. Esta reducción fue del 64 % para el ensayo realizado en el prototipo E2D-ROPS cuando se usaron uno o dos infladores del modelo SHI2-20V614.

La gran reducción del tiempo de despliegue producido por el uso de dos infladores indica que la ubicación de los infladores en las vigas inclinadas simétricamente con respecto al eje central de la AD-ROPS es más eficiente que la ubicación de un solo inflador en la viga transversal de la AD-ROPS.

Cuando sólo se instala un inflador SHI2-30V612 localizado en la viga lateral derecha, el tiempo de despliegue es de 195 ms, el cual es 12 ms superior que el tiempo de despliegue cuando este inflador está situado en la viga transversal, lo que significa que esta ubicación es menos eficiente, aunque el tiempo de despliegue es

suficientemente bajo ya que es inferior al tiempo de vuelco, así como inferior a otras pruebas realizados con AD-ROPS desarrollados previamente.

Estos resultados son lógicos ya que la primera configuración es simétrica con respecto al eje central de la AD-ROPS y la segunda no lo es. No obstante estos resultados son interesantes porque demuestran que, en caso de fallo de uno de los dos infladores, los cuales están ubicados en las vigas inclinadas, el otro inflador es capaz de desplegar y bloquear adecuadamente la AD-ROPS antes de golpear el suelo y de esta manera se incrementa la fiabilidad de la opción de instalar dos infladores, cada uno en una de las vigas inclinadas de las AD-ROPS.

El parámetro más determinante para caracterizar un inflador es el número de moles de gas que puede generar, ya que este parámetro determina la presión que puede proporcionar el inflador a un volumen definido. La proporción entre el número de moles del modelo SHI2-30V612 y el modelo SHI2-20V614 es 1,51 (0,6457 moles respecto a 0,427 moles). De acuerdo a la figura 42 mostrada en el apartado 4.2.2, la proporción entre las presiones suministradas por ambos infladores es de 1,46 (0,18 MPa respecto a 0,123 MPa), la cual es ligeramente inferior a la proporción entre los números de moles.

Teóricamente, la proporción entre el tiempo de despliegue usando el inflador grande o pequeño debiera ser de 1,21, que es la raíz cuadrada de 1,46. Sin embargo, en las pruebas realizadas utilizando la AD-ROPS C, usando dos infladores SHI2-20V614 y el SHI2-20V612 ha sido de 1,11 (108 ms respecto a 97 ms). Los resultados en los ensayos realizados en las AD-ROPS A y B usando los dos tipos de infladores han mostrado una proporción similar.

Vemos que esta proporción es inferior a la esperada teóricamente. Ello puede ser debido a que si observamos la figura 65, nos damos cuenta que el inflador SHI2-20V614 genera una presión de 0,123 MPa a los 15 ms, mientras que el SHI2-30V612 genera una presión de 0,18 MPa a los 20 ms, por lo que el flujo de masa es mayor para el inflador pequeño que para el grande, tal y como se observa en la figura 65.

Parece lógico que cuanto más grande sea la AD-ROPS, mayor será el inflador que se necesite, pero no es tan simple, porque al aumentar el tamaño de la AD-ROPS aumenta su volumen interior y disminuye por tanto la presión ejercida por el inflador en sus partes desplegables, pero al mismo tiempo, aumenta el área sobre la que se ejerce la presión y por tanto aumenta la fuerza ejercida. Tal aumento y disminución son proporcionales a la sección de las vigas de la AD-ROPS y se contrarrestan. La aceleración proporcionada por el inflador en las partes desplegables también será proporcional a su masa, la cual es proporcional al diámetro de los tubos. Visto todo esto, aunque es lógico pensar que una mayor AD-ROPS requiera un inflador mayor, no está claro que exista una relación directa entre el tamaño de la AD-ROPS y el tamaño del inflador más adecuado que optimice el resultado.

Si observamos los datos de la tabla 15, vemos que cuando se usan dos infladores en el E2D-ROPS y en la AD-ROPS, los tiempos de despliegue fueron 102 ms y 97 ms respectivamente, siendo su relación de 1,15, mientras que la relación de las vigas exteriores de despliegue es de 1,14 y su raíz cuadrada es 1,07.

Si comprobamos estos ratios comparando los resultados obtenidos en los ensayos de las AD-ROPS A y B, vemos que los ratios son de 1,12 y 1,13 respectivamente, mientras que su relación de radios es de 1,1 y por tanto su raíz cuadrada es de 1,04.

El incremento del tiempo de despliegue, usando el mismo tipo de inflador, considerando el incremento del tamaño de la AD-ROPS, es ligeramente superior que el esperado debido al incremento de la masa de la parte desplegable, si bien ello puede ser debido a que la reducción del volumen interior de la AD-ROPS no decrece de forma proporcional al tamaño de la misma, por lo que la reducción es menor que la esperada.

Por tanto, teniendo en cuenta los resultados anteriores, está claro que se puede instalar cualquiera de las configuraciones propuestas. Sin embargo, los infladores SIH2-30V612 son capaces de desplegar y bloquear las AD-ROPS de forma más rápida que el modelo SIH2-20V614. Si además consideramos que el coste de los infladores es similar, el modelo SIH2-30V612 es preferible debido a la ventaja que conlleva la reducción del tiempo de despliegue cuando se usa este inflador.

Además, si observamos que el tiempo de despliegue del ensayo realizado en la AD-ROPS C, utilizando un inflador SIH2-20V614 situado en la viga derecha, fue de 280 ms, que si bien es inferior al tiempo de vuelco, es 85 ms superior al tiempo que si utilizamos el inflador SIH2-30V612, es lógico aconsejar, por razones de seguridad, la colocación de los infladores mayores siempre que sea posible.

Es posible instalar sólo un inflador pequeño localizado en la viga transversal superior, ya que el tiempo de despliegue es suficientemente bajo. Sin embargo, la fiabilidad proporcionada al instalar dos infladores en las vigas transversales, es mayor, ya que se asegura (con una mínima posibilidad de fallo simultáneo de los dos) que en caso de fallo de uno de los dos infladores, el sistema sigue siendo operativo. Por lo tanto es aconsejable instalar dos infladores en los prototipos tipo E2D-ROPS y en la AD-ROPS C, así como rediseñar el sistema de bloqueo en los tipos AD-ROPS A y B, de tal manera que sea posible instalar dos infladores en las vigas inclinadas.

5.4. Evaluación de los modelos de tractores en los cuales es posible instalar un determinado tipo de AD-ROPS para asegurar un resultado positivo en los ensayos del Código 6

Además del E2D-ROPS, se realizaron ensayos con los modelos de AD-ROPS proporcionados por la empresa AIR-ROPS NA 2012 S.L., los cuales han sido una variación del modelo original, pero en distintos tamaños y capacidades en función de la masa de referencia de los vehículos en que pueden ser instalados, con el objeto de proporcionar un abanico de modelos de AD-ROPS que puedan montarse en diferentes tractores, cumpliendo la normativa correspondiente.

Las AD-ROPS montadas en tractores del tipo T2 deben cumplir, por una parte con los requisitos del Código 6, y por otra parte con la Directiva 74/347/CEE, relativa al campo de visión. Además, deberían cumplir una normativa específica desarrollada para establecer los requisitos de montaje de una AD-ROPS montada frontalmente en tractores T2.

También se debería desarrollar nueva normativa específica para AD-ROPS montadas en tractores T2, por detrás del asiento y para AD-ROPS que puedan montarse en otro tipo de vehículos como quads, cortadores de césped, carros de golf..., debido a que no existe normativa publicada para las AD-ROPS, exceptuando la norma ANSI/ASABE S599, aprobada el 10 de Noviembre de 2010 en el ámbito de los EE.UU.

En el diseño de las AD-ROPS de los tipos A, B y C, se tomaron en cuenta las consideraciones del Código 6 para su diseño y construcción, y se realizaron los distintos ensayos en la Estación de Mecánica Agraria (EMA), que es la única estación de ensayos autorizada en España para el ensayo de ROPS de acuerdo a los códigos de la OCDE. Los ensayos se realizaron utilizando como masas de referencia 500 kg, 1.000 kg y 2.500 kg, respectivamente

El resultado de los ensayos depende del momento en el cual se detiene el mismo, y este a su vez depende de la masa de referencia. Por esto, cada una de las AD-ROPS tiene definido unos límites superiores para la masa de los tractores en los cuales puede ser instalada, que coincide con la masa en vacío de estos tractores y se corresponde con su masa máxima admisible, por razones de seguridad al vuelco, que es 1,75 veces dicha masa en vacío. Por lo tanto, las AD-ROPS del tipo A, B y C sólo se pueden montar en tractores que tengan una masa máxima autorizada de hasta 875 kg, 1.750 kg y 4.375 kg respectivamente (OCDE, 2012).

El Código 6 define las condiciones de aceptación para las ROPS. Existen cinco condiciones de aceptación, y de ellas, tres no dependen de la ubicación del asiento del tractor, que es una característica del modelo de tractor. Las dos condiciones de aceptación específicas relacionadas con el modelo de tractor en el que se podría montar la estructura antivuelco son: durante los ensayos, excepto el de sobrecarga, ninguna parte de la estructura de protección deberá invadir la zona libre, y, por otra parte, durante los ensayos, la estructura de protección no deberá ejercer ninguna acción sobre la estructura del asiento.

La primera condición de aceptación es, en la mayoría de los casos, la condición principal para determinar si una determinada ROPS, montada en un modelo de tractor determinado, es capaz de lograr un resultado positivo en la secuencia de ensayos

establecida en el Código 6. La zona libre está definida por el Código 6 y su ubicación depende de la ubicación del punto indicativo del asiento del tractor (SIP)

Por esta razón y teniendo en cuenta que ninguna de las AD-ROPS probadas en la EMA se colapsó durante los ensayos, el parámetro que determinaría para un modelo de tractor específico si el resultado de los ensayos es positivo, sería aquel que determinaría si la ROPS ha invadido la zona de seguridad durante los ensayos.

Este parámetro está determinado por la ubicación del SIP con respecto a los puntos de fijación de la estructura antivuelco instalada en el tractor, en combinación con el tamaño y ubicación del punto duro trasero del tractor.

5.4.1. Resultados del ensayo en las AD-ROPS realizados en la EMA

El 23 de agosto del 2013 se realizó un ensayo en la EMA de acuerdo a lo marcado en el Código 6, generándose un informe de la prueba por parte de los técnicos de Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

En las figuras 68 se muestran las curvas de fuerza-deformación obtenidas de los ensayos longitudinales. ES posible verificar que la AD-ROPS A no colapsó, así como la medida de la máxima deformación que produjo en la AD-ROPS.

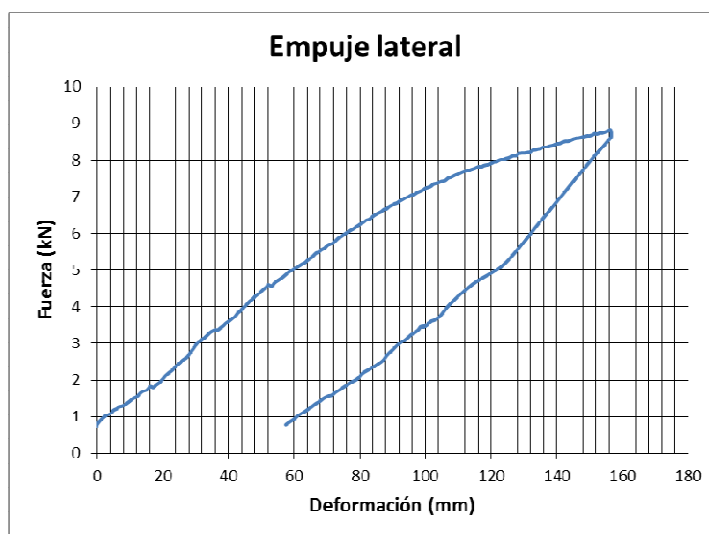


Figura 68a.- Resultado del ensayo lateral de la AD-ROPS A en la EMA

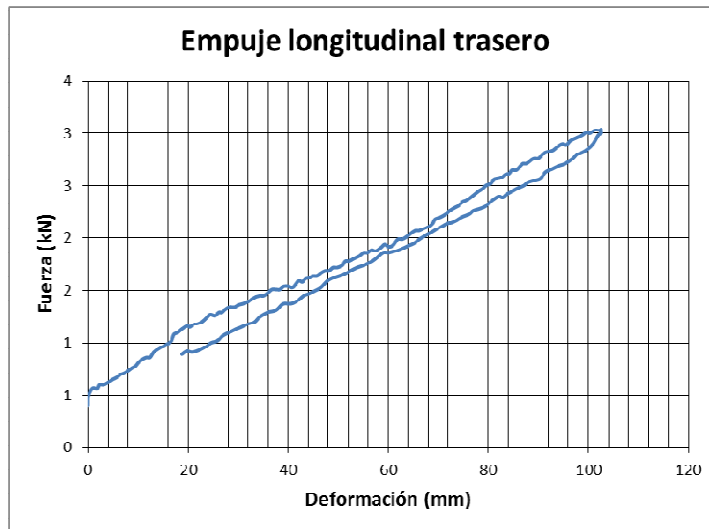


Figura 68b.- Resultado del ensayo trasero de la AD-ROPS A en la EMA

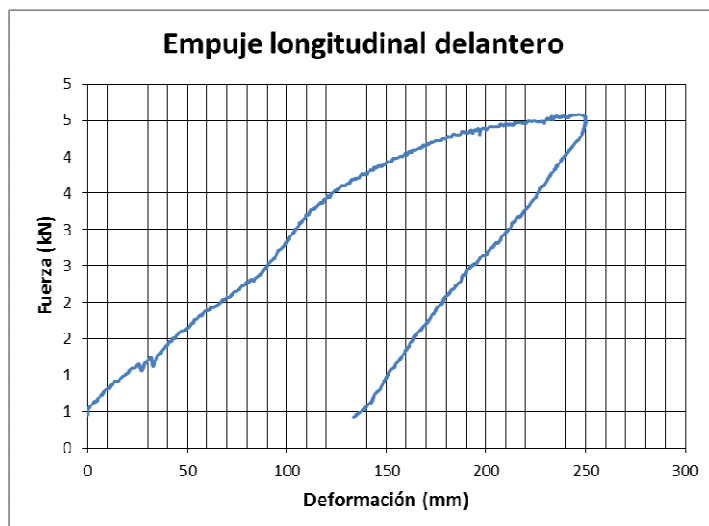


Figura 68c.- Resultado del ensayo trasero de la AD-ROPS A en la EMA

En el informe advierten que los resultados del ensayo no son válidos para aprobar la estructura, ya que los mismos han sido realizados en un prototipo de una estructura que no estaba sujeta a un tractor real, y por tanto no se puede evidenciar que no se invade durante el mismo el límite del volumen de la zona de seguridad (DLV), y por lo tanto, no se puede asegurar que se hayan cumplido todas las condiciones de aceptación.

Sin embargo, gracias a los resultados de estos ensayos es posible conocer las deformaciones máximas sufridas por la AD-ROPS durante los mismos, y determinar si al montar esta estructura; ensayada en la EMA, en un tractor determinado, del cual conocemos sus dimensiones, masa en vacío, ubicación del SIP, así como disposición del

punto duro trasero, y determinando el punto de anclaje de la misma; se obtendría un resultado positivo de los ensayos del Código 6.

Aun en el caso de obtener un resultado negativo de los ensayos, sería posible establecer los cambios necesarios en el tractor para que este resultado fuera positivo. Estos cambios podrían consistir en la variación de la ubicación del SIP, el tamaño o la ubicación del punto duro trasero o el punto de la fijación de la AD-ROPS al tractor.

De la misma manera, a partir de los resultados del ensayo de una determinada AD-ROPS, sería posible determinar el lugar geométrico de sus puntos de anclaje a un determinado tractor que proporcionarían un resultado positivo de los ensayos del código 6. Este lugar geométrico dependería de la situación del SIP del tractor, de las dimensiones y ubicación de su punto duro trasero y de las características de la AD-ROPS. Este lugar geométrico podría ser determinado como un volumen tridimensional o como un área dentro del plano de simetría del tractor.

El 28 de agosto de 2013, también fueron probadas en la EMA, utilizando la misma metodología que para la AD-ROPS A, los modelos B y C, obteniéndose las distintas curvas de fuerza-deformación.

5.4.2. [Modificación de los parámetros del modelo de tractor para asegurar un resultado positivo en los ensayos según el Código 6.](#)

Para realizar este análisis se ha realizado un modelo tridimensional informático en el programa NX8.5 de la empresa Siemens, gracias al cual, se solicita una serie de parámetros, tanto del tractor, como de la AD-ROPS, antes y después de la prueba realizada en una estación de ensayo homologada.

El programa determina gráficamente el volumen tridimensional de la zona efectivamente protegida por la estructura, tanto antes como después de la deformación sufrida durante la secuencia ensayos realizados según el Código 6. Por lo tanto, el programa evalúa el resultado y permite garantizar el resultado positivo o negativo del

ensayo, teniendo en cuenta los criterios de exposición definidos por el Código 6 y reportados por Ayers et al. (1994).

Para el correcto funcionamiento del programa requiere la introducción de todos los parámetros que pueden afectar al resultado de los ensayos del Código 6, así como las que afectarían al cumplimiento de la Directiva 74/347/CEE:

- Dimensiones y ubicación de las AD-ROPS en sus posiciones extendida y recogida
- El tamaño y la ubicación del arco duro trasero
- Ubicación del asiento, incluyendo el SRP y SIP
- Las dimensiones y la ubicación del volante
- La deformación sufrida por las AD-ROPS durante los ensayos

Como ejemplo, vamos a analizar el resultado en un modelo de tractor con las características mostradas en la figura 69, en el cual se instala una AD-ROPS B. Para ilustrar mejor el método, vamos a suponer una gran deformación de la AD-ROPS B con lo que se observan mejor las gráficas y las áreas.

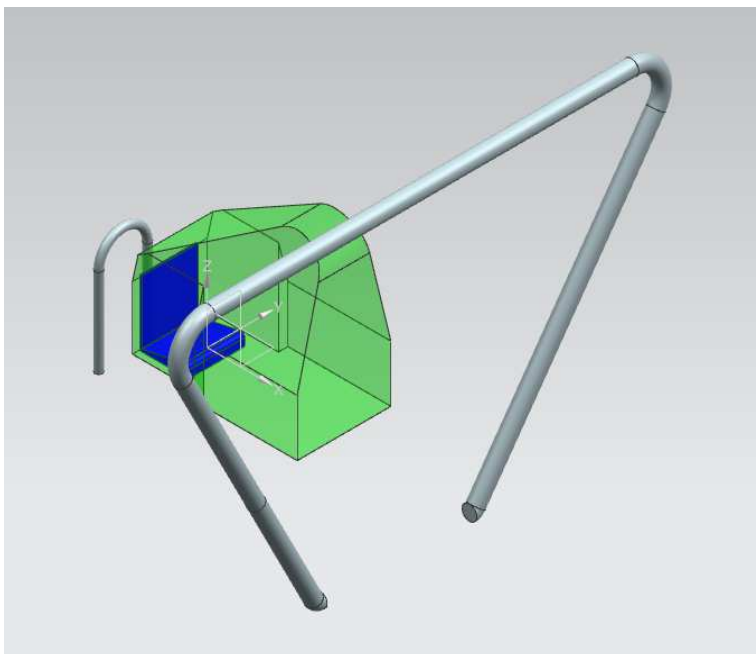


Figura 69.- Representación del arco trasero, arco delantero, asiento y zona de seguridad

Este programa calcula y representa gráficamente el volumen tridimensional de la zona protegida. Este volumen es el volumen encerrado por el desarrollo de una recta tangente que está asociada por un lado a la AD-ROPS deformado y por otro lado al arco de seguridad trasero.

El programa también muestra la zona de seguridad y mediante la comparación de los dos volúmenes es fácil determinar los resultados de las pruebas positivas o negativas, ya que además de forma gráfica es posible determinar la interferencia de ambos.

La figura 70 muestra el resultado para el modelo de tractor, que tiene las características que se muestran en la figura 69 equipados con la AD-ROPS B. En esta figura, el área protegida dentro del plano de simetría del tractor ha sido resaltado para que se observe mejor de forma gráfica el resultado. Está claro que la zona de seguridad ha sido invadida durante las pruebas y el resultado de la prueba es negativo.

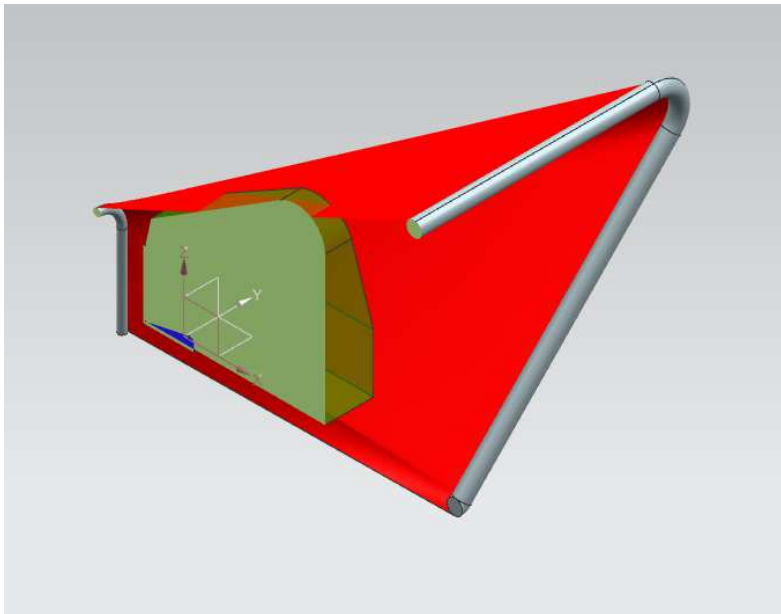


Figura 70.- Verificación de la interferencia de los volúmenes

Sin embargo, es posible variar algunos de los parámetros que determinan el resultado de la simulación para proporcionar un resultado positivo. La modificación más simple y menos costosa del modelo de tractor se consigue variando el tamaño o la ubicación del arco trasero del tractor (punto duro trasero). La figura 71 muestra el área protegida por el aumento de la altura del arco duro trasero de 350 mm a 500 mm. Se

muestra que el volumen de la zona de seguridad no protegida por la AD-ROPS se ha reducido, pero el resultado de la prueba todavía sería negativo.

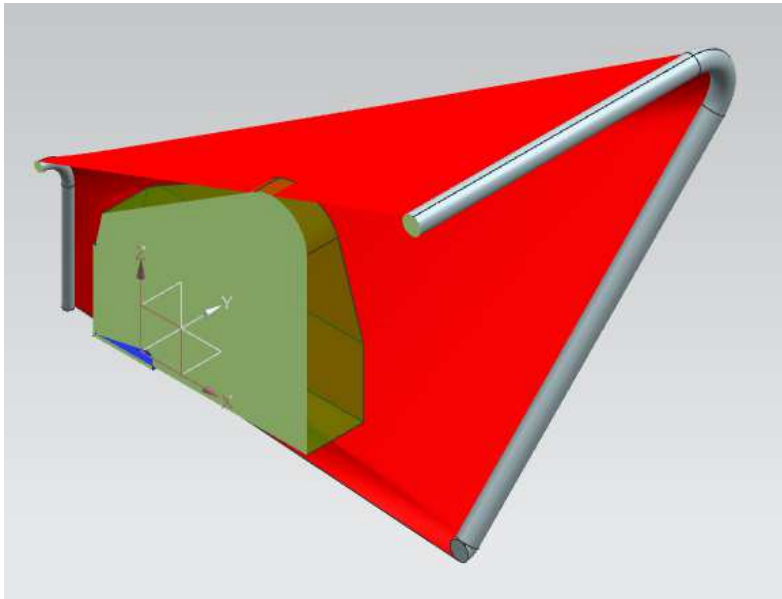


Figura 71.- Incremento de tamaño del arco trasero y verificación de volumen

Al retrasar el nuevo arco trasero 100 mm, se puede comprobar en la figura 72 que la zona de seguridad no se ha invadido durante las pruebas y el resultado sería positivo.

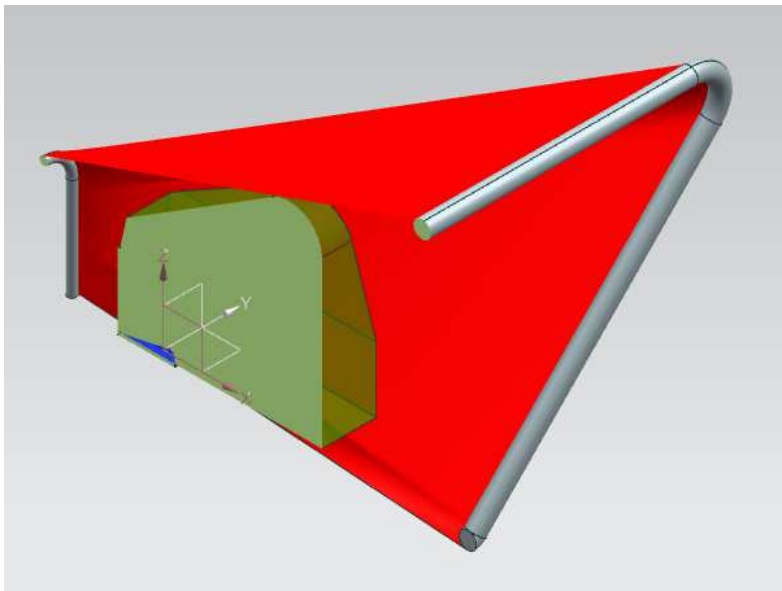


Figura 72.- Retraso del arco trasero y verificación de volumen

Por lo tanto, se ha demostrado que es posible garantizar un resultado positivo del Código 6 de un modelo de tractor equipado con una AD-ROPS determinada y ya ensayada previamente, mediante la variación de algunos de los parámetros del tractor que determinan los resultados de las pruebas, tales como la altura y ubicación del punto duro trasero.

Además, el modelo de tractor equipado con las correspondientes AD-ROPS debe cumplir con los requisitos de la Directiva 74/347/CEE relacionadas con el campo de visión. El programa también permite de forma gráfica comprobar si se cumplen estos requisitos, si bien se analizará con posterioridad.

5.4.3. Determinación del lugar geométrico del punto de fijación de la AD-ROPS para asegurar un resultado positivo en los ensayos según el Código 6.

En caso de montaje de una AD-ROPS ensayada de acuerdo con el Código 6, en un modelo de tractor con unas características determinadas, el resultado del ensayo dependerá de la ubicación del punto en el cual se montan las AD-ROPS al tractor. Por lo tanto, es posible determinar el lugar geométrico de los puntos de fijación de unas determinadas AD-ROPS a un tractor dado, asegurando un resultado positivo del ensayo. Este lugar geométrico puede ser representado en tres dimensiones, pero es más fácil y más lógica su representación como el área del plano de simetría del tractor que debe ser la intersección de la línea que une los dos puntos de fijación ROPS con el plano de simetría.

Esta zona, que se muestra en la figura 73 para un modelo de tractor que tiene las características que se muestran en la figura 68.

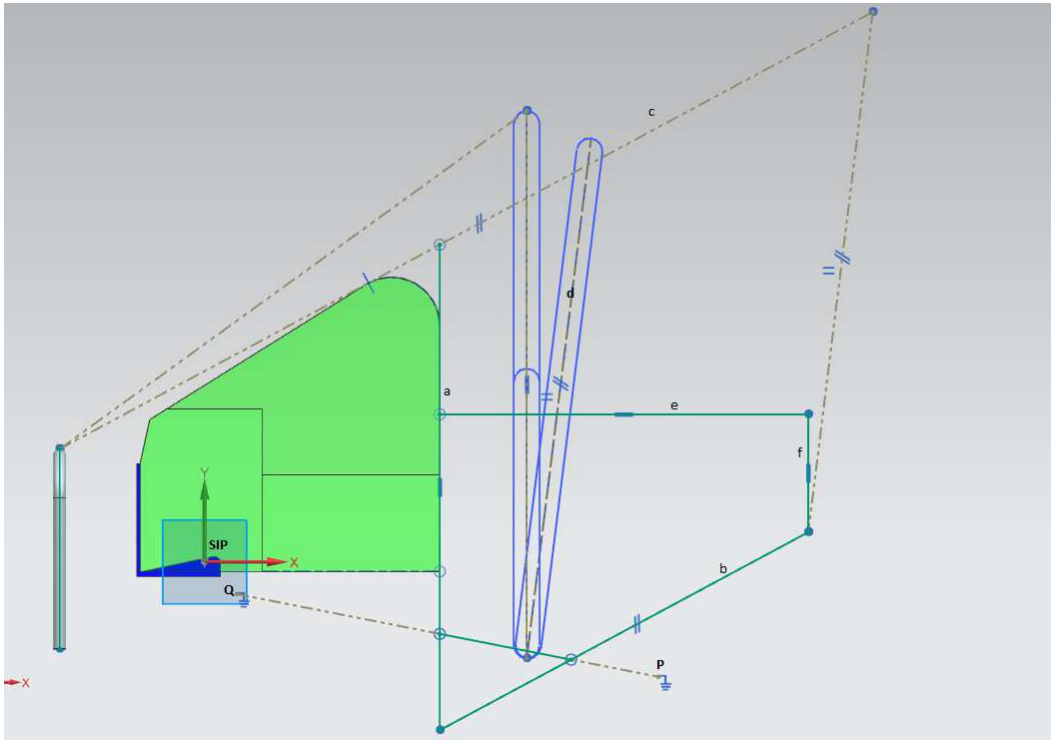


Figura 73.- Lugar geométrico de los puntos de anclaje de la AD-ROPS que garantiza un resultado positivo de los ensayos del Código 6

Esta área se delimita por:

- El límite trasero es una recta vertical que coincide con la línea vertical frontal de la zona de seguridad (a), definida por el Código 6
- El límites inferior es una línea recta (b) paralela a la recta que pasa por el punto duro trasero y es tangente a la zona de seguridad (c), y está situada bajo ella y a una distancia equivalente a la proyección de la AD-ROPS deformada (d) sobre la perpendicular a la recta tangente citada
- Los límites superior y delantero coinciden con las partes superior y delantera del bonete del tractor (e) y (f), por razones constructivas.

Aunque este lugar geométrico permite un resultado positivo para los ensayos del Código 6, no tiene en cuenta los requisitos de la Directiva 74/347/CEE relacionados con el campo de visión que reducen y limitan este lugar geométrico, ya que habría que tener en cuenta que la interferencia visual que produce el AD-ROPS, en su posición recogida, podría limitar el campo de visión del tractorista.

Para asegurar que el tractor con la AD-ROPS cumple con los requisitos de la Directiva 74/347/CEE, es necesario ésta, en su posición retraída, no provoque un efecto de enmascaramiento conforme a la definición incluida en la directiva citada.

En el caso de que la AD-ROPS recogida provoque un efecto de enmascaramiento, éste será lo suficientemente grande como para producir un incumplimiento de los requisitos de la directiva ya que la viga transversal de las AD-ROPS es grande y además está suficientemente alejada de los ojos del conductor.

Para comprobarlo, se sigue el procedimiento indicado en la propia normativa, y en primer lugar se modeliza al tractorista en el asiento para identificar la línea de visión del mismo, tal y como se observa en la figura 74

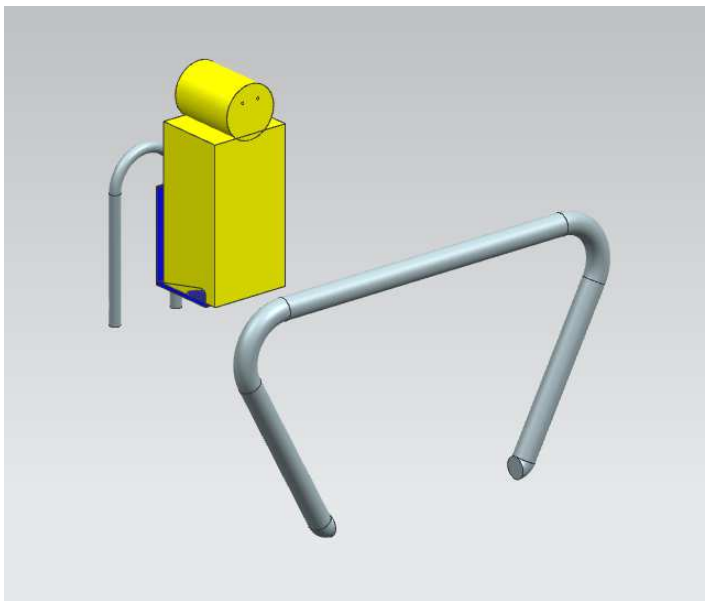


Figura 74.- Modelización del tractorista, en particular de los “ojos”.

Una vez realizado este punto, se dibuja con el software un hemisferio centrado en la proyección del punto de referencia (RP) en el plano de tierra y que tiene un radio de 12.000 mm. También se dibuja el plano que contiene los ojos del conductor y es tangente a la viga transversal de la AD-ROPS recogida, observándose la intersección de este plano con la base del hemisferio que se encuentra en el plano del suelo.

La figura 75a muestra un esquema del modelo de tractor, en la cual se observa al conductor, con sus ojos definidos en la Directiva 74/347/CEE y la AD-ROPS B, en su posición recogida. Junto a esto, se muestran los resultados gráficos proporcionados por el software, en relación con el campo de visión, en este caso se ha puesto la AD-ROPS en la parte inferior de la zona geométrica para dar un resultado positivo en el Código 6 y observamos que el plano no invade la semiesfera, por lo que el resultado es positivo pues no existe interferencia visual.

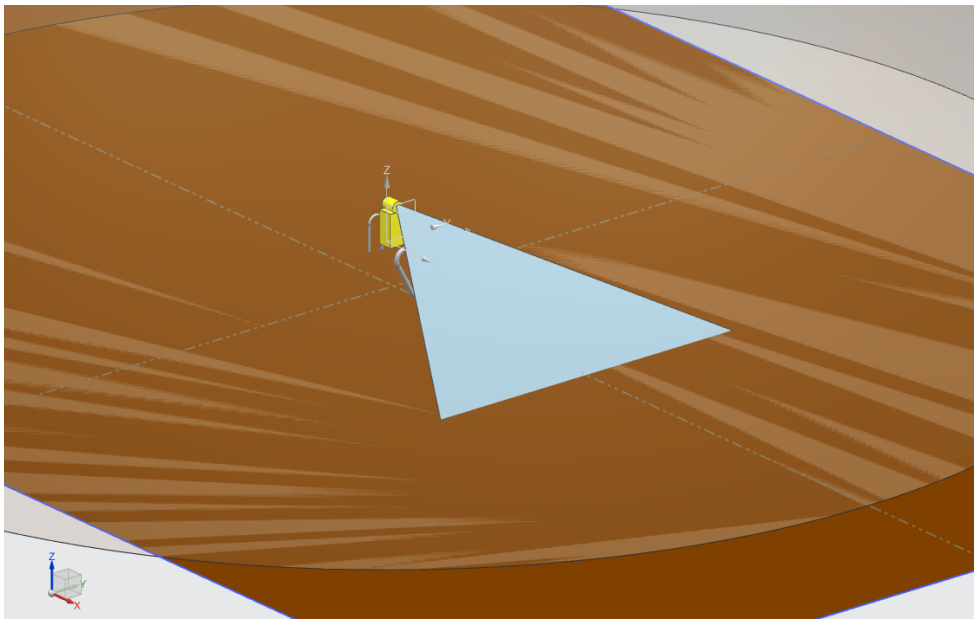


Figura 75a.- Zona de interferencia de visión con el arco colocado lo más abajo posible

Sin embargo, si colocamos el arco en la posición más alta posible del lugar geométrico definido anteriormente, observamos que el resultado es negativo ya que interfiere en la semiesfera, tal y como se observa en la figura 75b

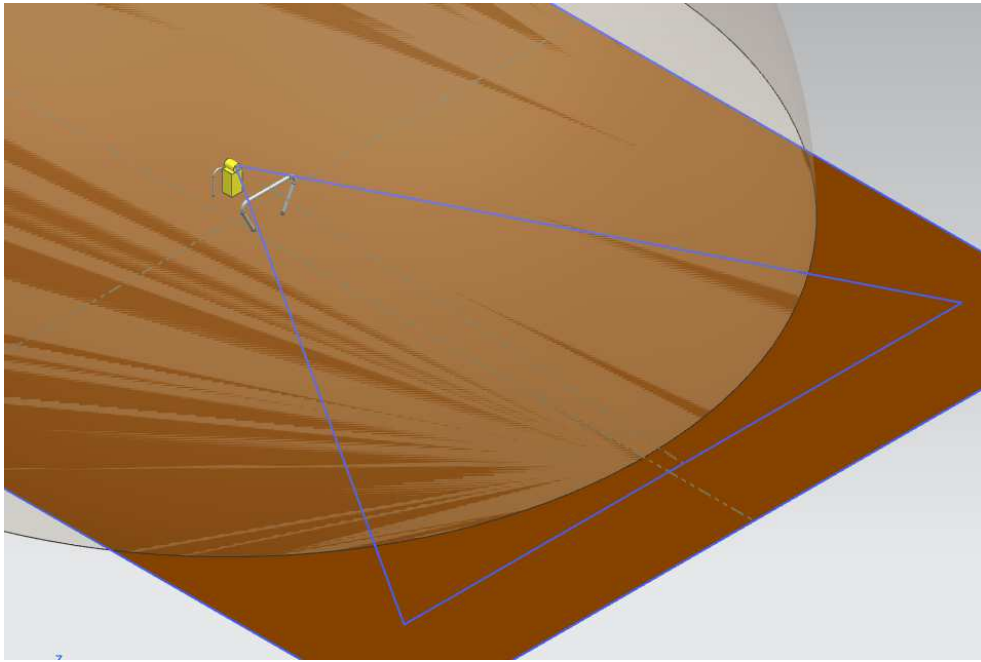


Figura 75b.- Zona de interferencia de visión con el arco colocado lo más arriba posible

Es posible comprobar que, en el primer caso, que el plano corta el suelo dentro del semicírculo de visión definido por la Directiva 74/347/CEE, no cortando la semicircunferencia y no hay enmascaramientos en el campo de visión producidos por la AD-ROPS. Sin embargo, en el segundo caso, el plano se cruza con el semicírculo de visión, produciendo la AD-ROPS efectos de enmascaramiento y en ese caso no se cumple la directiva, por lo que el lugar geométrico definido anteriormente debe ser reducido debido a esta nueva restricción.

Es posible definir lugar geométrico, que se muestra en la figura 73, que cumple los requisitos de campo de visión, trazando para ello la línea de los puntos de fijación de las AD-ROPS que hace que la línea de visión se cruce con el plano de suelo en el perímetro del semicírculo de visión, según se define en la Directiva 74/347/CEE.

En teoría, la línea consta de dos partes distintas. La primera parte, en el lado izquierdo de la figura 73, es una línea, paralela a la recta que conecta el punto de referencia con la proyección del final del sector de visión en el plano medio del tractor, situada 800 mm (altura de la AD-ROPS recogida) por debajo de ella. Tanto el PR como el sector de visión se definen en la Directiva 74/347/CEE. La segunda parte, en el lado derecho de la figura 76, es una curva, aunque esta parte puede estar fuera del lugar

geométrico de los puntos de fijación que permiten un resultado positivo de los ensayos del Código 6.

A medida que la AD-ROPS se acerca al tractorista, la intersección de la línea de visión que pasa por su extremo exterior, cruza el terreno más cerca a la proyección de la RP sobre el plano del suelo, por lo que permite el aumento la altura de las AD-ROPS sin causar la intersección de la línea de visión con el semicírculo de visión. Por lo tanto, cuanto más cerca del el conductor estén las AD-ROPS, más alto es el límite superior donde se puede colocar el punto de unión que permita cumplir los requisitos relativos al campo de visión.

En la parte derecha de la figura 73, cuando la AD-ROPS está lejos del conductor, el ángulo formado por la línea de visión y el plano medio del tractor aumenta a medida que la AD-ROPS se acerca al conductor, y la relación entre la reducción de la distancia entre la AD-ROPS y la proyección del PR sobre el suelo, y el incremento de la altura de su punto de anclaje que permite cumplir los requisitos del campo de visión, no es lineal. Sin embargo, cuando la AD-ROPS, unida al tractor en el punto más alto que permite el cumplimiento de los requisitos del campo de visión, está tan cerca del conductor que la línea de visión intersecta el sector de visión en su punto más exterior, el ángulo entre la línea de visión y el plano medio permanece constante aunque la ROPS se acerque al conductor. Esto sucede porque la línea que conecta el ojo derecho del conductor con el extremo de la estructura intersecta el semicírculo de visión fuera del sector de visión eliminando por tanto el efecto de enmascaramiento y haciendo que el mayor efecto de enmascaramiento sea el producido en el punto en el cual el extremo exterior de la viga transversal de la AD-ROPS está en línea con el ojo derecho del conductor y el final del sector de visión definido por la Directiva 74/347/CEE.

Usando el SRP como el origen de coordenadas y teniendo en cuenta que el RP se encuentra 270 mm a la derecha del SRP y 700 mm más alto y que la distancia entre los ojos del conductor es de 65 mm, de acuerdo con la Directiva 74/374/CEE, es posible calcular la distancia entre la SRP y el punto de unión, medido en el plano medio del tractor, que coincide con la línea que une el ojo derecho del conductor con la parte final de la AD-ROPS, así como con el final del sector de visión que produce una cuerda de 9.500 mm en el semicírculo de visión.

Para valores más altos de esta distancia, la relación entre la distancia y la altura máxima admisible del punto de las AD-ROPS en las cuales se une, no es lineal y es posible establecerlo mediante la representación en el sistema diédrico, como se muestra en la figura 76. En este sistema, los puntos y las líneas están representados por sus proyecciones sobre los planos horizontal y vertical.

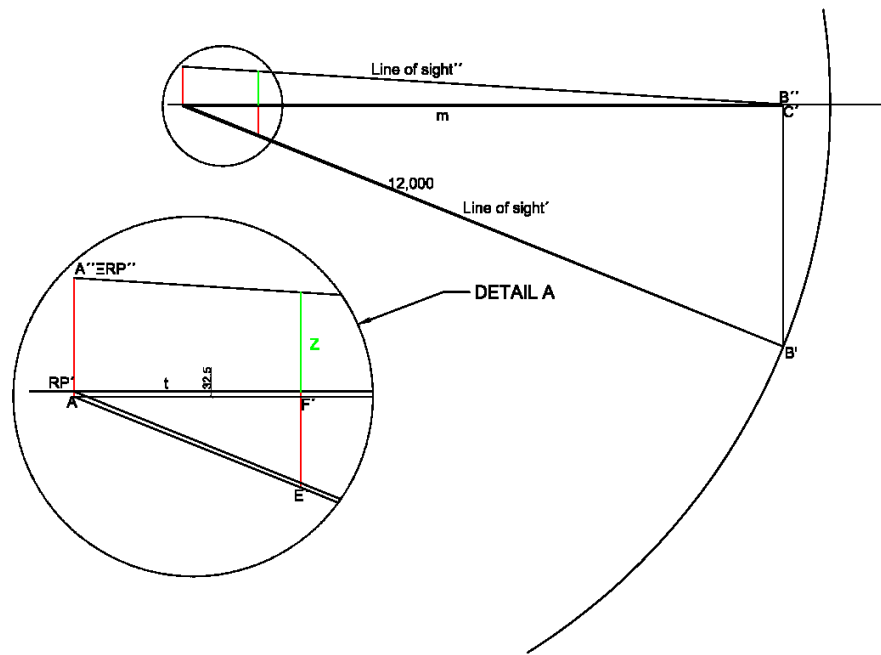


Figura 76.- Representación en el sistema diédrico de la zona de visión

En la posición límite de la AD-ROPS, la proyección horizontal de la línea de visión, que une el ojo derecho del conductor y el extremo superior de la AD-ROPS, dibujado en la línea de tierra, intercepta el círculo de la visión en un punto incluido en su perímetro.

Es posible ver que se forman tres triángulos rectángulos. El primero de ellos está formado por tres puntos: la proyección de la RP sobre el suelo que es el plano horizontal (RP'), la intersección de la proyección horizontal de la línea de visión con el semicírculo de visión (B') y la intersección de la línea de tierra y la perpendicular a la línea de tierra que pasa por B' (B''). El segmento RP'-B' mide 12.000 mm de acuerdo con la Directiva 74/347/CEE. Las longitudes de los otros dos lados dependen de la distancia entre el punto de la AD-ROPS y el SRP. El cateto corto es la mitad de la

cuerda interceptada por la línea de visión y hemos llamado “m” a la longitud del cateto mayor, en la figura 76.

El segundo y tercer triángulos rectángulos son semejantes, el segundo está formado por tres puntos: la proyección sobre el plano del suelo del ojo derecho del conductor (A'), la intersección de la proyección horizontal de la línea de visión con el semicírculo de visión (B') y la intersección de la paralela a la línea de tierra a través de A' y la perpendicular a la línea de tierra a través del segundo punto (C'); y el tercero está formado por RP', D' y E', donde D' y E' son los extremos del segmento de la proyección de la viga transversal de la AD-ROPS en el plano horizontal limitado este segmento por la hipotenusa y el cateto horizontal del segundo triángulo, respectivamente.

Usando el teorema de Thales es posible obtener la ecuación [1].

$$\frac{t}{560.5} = \frac{m}{\sqrt{12,000^2 - m^2} - 32.5} \quad [1]$$

$$t = x - 270$$

donde “x” es la distancia entre el SRP y el final de la AD-ROPS y “m” es la longitud del lado del triángulo rectángulo paralelo a la línea de tierra. La mitad de la diferencia entre la anchura de la AD-ROPS (1.186 mm) y la distancia entre los ojos del conductor (65 mm) es de 560,5 mm.

De la ecuación [1] es posible obtener la ecuación [2] que muestra el valor de “m” en función de los valores de “t”

$$m = \frac{\sqrt{\frac{13,273,270}{t^2} + 575,995,600 \left(1 + \frac{314,160}{t^2}\right)} - \frac{72,865}{t}}{2 \left(1 + \frac{314,160}{t^2}\right)} \quad [2]$$

En el plano vertical, por encima de la línea de tierra, se forman dos triángulos rectángulos semejantes. El primero de ellos está formado por RP", que es la proyección del ojo derecho del conductor en el plano vertical, RP' y B". El segundo está formado por B", F" y G", donde F" y G" son los extremos de la proyección de la AD-ROPS en el plano vertical, extendida solo hasta la línea de tierra.

La hipotenusa del primer triángulo es la proyección de la línea de visión sobre el plano vertical, las medidas de sus catetos horizontal y vertical son "m" y la altura del punto de referencia, respectivamente. El valor de "m" se define por la ecuación [2] y la altura del punto de referencia es de 700 mm.

Usando el teorema de Thales es posible establecer la ecuación [3].

$$\frac{h}{m} = \frac{z}{m - t} \quad [3]$$

Donde "h" es la altura del punto de referencia (1.400 mm), "m" y "t" son los valores definidos en la ecuación [2] y "z" es la altura máxima de la AD-ROPS, medida desde el suelo, asegurando que cumple los requisitos del campo de visión.

Desde estas ecuaciones es posible obtener la ecuación [4] en la cual se define el valor de "z" como una función entre la distancia de la AD-ROPS y el SRP

$$z = h \left(1 - \frac{2t \left(1 + \frac{314,160}{t^2} \right)}{\sqrt{\frac{13,273,270}{t^2} + 575,995,600 \left(1 + \frac{314,160}{t^2} \right)} - \frac{72,865}{t}} \right) \quad [4]$$

Como el punto de unión está por debajo del punto más alto de la AD-ROPS retraída, los valores de "z" tienen que reducirse en la altura de la AD-ROPS ($h_{ROPS} = 860$ mm).

Como en el Código 6 y en la figura xxx se utiliza el SIP como origen de coordenadas, las coordenadas del punto de fijación tienen que ser referidas a la SIP como se define por la ecuación 5.

$$z' = z - z_{SIP} - h_{ROPS} \quad [5]$$

donde z' es la coordenada vertical del punto de unión que limita el lugar geométrico de acoplamiento, que permite a las AD-ROPS cumplir con los requisitos de campo de visión, referidos al SIP, x_{SIP} y z_{SIP} son las coordenadas del SIP referidas al SRP y z_{SRP} es la altura del SRP.

En este caso particular, tal y como se muestra en la figura 76, tenemos que:

$$h = 1.400 \text{ mm}$$

$$x_{SIP} = 170 \text{ mm}$$

$$z_{SIP} = 730 \text{ mm}$$

$$z_{SRP} = 730 \text{ mm}$$

$$h_{ROPS} = 860 \text{ mm}$$

Además, es necesario deshacer el cambio de variable ($t = x - 270$) y referenciar los valores de x respecto al SIP, que es el origen de coordenadas, donde $x' = x - x_{SIP}$.

Cuando la cuerda interceptada por la línea de visión es la definida por el sector de visión, que es 9.500 mm, el cateto corto del triángulo rectángulo es 4.750 mm y el valor de la hipotenusa es 12.000 mm. Usando el teorema de Pitágoras, se ha calculado el valor de “m” obteniéndose el valor de 11.020 mm.

Mediante la sustitución de este valor de “m” en la ecuación [1], se obtiene el valor de “t” que es 1.309 mm y por tanto el valor de “x” es 1.579 mm, con lo que el valor de “x” es de 1.409 mm. Sustituyendo el valor de “t” en la ecuación [4] y el valor de “z” en la ecuación [5], se obtiene un valor para “z” de -357 mm. Por lo tanto el punto de la línea límite superior del lugar geométrico para los puntos de fijación de la AD-ROPS para cumplir el requisito del campo de visión es el punto (1409, - 357), referido al SIP que es el origen de coordenadas.

La línea que limita el lugar geométrico citado, que se muestra en la figura 76, tomando la SIP como el origen de coordenadas, es una recta que pasa por el punto P (1409, -357) y un punto incluido en la línea vertical desde el RP y a 860 mm (h_{ROPS}) por debajo de la RP, que se muestra en la figura 76 como punto Q. De este punto hacia la derecha, la línea sería la curva definida por la ecuación [6].

La figura 76 muestra que el punto P está fuera de lugar geométrico del punto de unión de la AD-ROPS que permite que un resultado positivo de las pruebas del Código 6. Por lo tanto, en este caso, la línea que limita el lugar geométrico que permite tanto este resultado positivo y los requisitos del campo de visión es la recta citada, tal y como se observa en la figura 76.

5.4.4. Montaje de la AD-ROPS en vehículos distintos a los tractores.

Se realizó una prueba de vuelco real con un quad equipado con el AD-ROPS A montado en la parte posterior del mismo, detrás del asiento. La AD-ROPS estaba equipada con el sistema de activación, regulado para activar los sistemas de despliegue cuando el ángulo de inclinación lateral llegara a 50°. La prueba se hizo levantando sus ruedas de la derecha mediante una plataforma, tal y como se describe en la sección 4. Cuando el quad alcanzó el ángulo de inclinación crítico del mismo, con lo que comienza el vuelco, se alcanzó el ángulo de activación del sistema y se activó la AD-ROPS, que se desplegó y bloqueó en la posición operativa.

Se pudo observar que el despliegue efectivo y completo y el bloqueo en la posición de seguridad sucedieron mucho antes que la AD-ROPS impactara contra el suelo. El tiempo de despliegue es tan corto que durante este proceso el quad describió un ángulo de giro de sólo 5 grados. El tiempo de activación y despliegue efectivo fue de alrededor de 155 ms, mientras que el tiempo de vuelco total fue de alrededor de 775 ms.

El despliegue de la AD-ROPS no puso en peligro al conductor porque nunca invadió la zona ocupada por él. Además se observó que ninguna parte de la AD-ROPS invadió la zona de seguridad durante el despliegue.

El ensayo real de vuelco demostró que es necesario utilizar el cinturón de seguridad debido a que la correa no pudo retener eficazmente al conductor dentro de la zona protegida por la estructura antivuelco en su posición desplegada. Este ensayo demostró que la AD-ROPS era capaz de proteger efectivamente al conductor del quad en caso de vuelco lateral si el conductor permanece en su asiento con el cinturón de seguridad abrochado y con la cabeza apoyada en el volante.

El tiempo de despliegue fue mucho más corto que el tiempo de vuelco lo que significa que es posible aumentar el ángulo de activación de la AD-ROPS a 60° como se sugiere por Ballesteros et al. (2013).

La deformación de la ROPS fue muy pequeña lo que sugiere que la AD-ROPS sería capaz de proteger al conductor en caso de vuelcos del quad en condiciones de mayor peligro (velocidad y por tanto más energía) que el simulado en la prueba real.

5.5. Sistema de activación de las AD-ROPS

Para el desarrollo del sistema de activación consideramos que, en caso de vuelco, el conductor se encuentra en su asiento, correctamente sentado y con el cinturón de seguridad abrochado. De esta forma, el tractorista está protegido porque la ROPS, una vez desplegada, protege adecuadamente la zona de seguridad y el cinturón le ayuda a mantenerse dentro de ella.

Además, el cinturón de seguridad evita que, en caso de vuelco delantero, el tractorista sea proyectado hacia adelante e invada el área descrita por la ROPS, en su despliegue. La norma ANSI/ASABE S599, de noviembre de 2010, de la Sociedad Americana de Ingenieros Agrícolas y biológicos (ASABE) exige que las ROPS automáticamente desplegadas AD-ROPS incluyan un sistema que evite el despliegue en caso de que no haya nadie sobre el asiento, aunque nada prescribe respecto al cinturón de seguridad.

Se ha desarrollado un sistema de activación que incluye un conjunto de sensores y un sistema de control digital, gobernado por un microcontrolador, que utiliza un software específico que analiza y filtra los datos de tal forma que son evitados tanto los falsos negativos como los falsos positivos.

El sistema tiene un disparador que activa los infladores de airbag y que también puede activar otros mecanismos de seguridad derivados, como pueden ser un avisador telefónico con GPS incorporado para emisión de mensaje de auxilio con localización exacta (sistema denominado e-Call) y un avisador visual/acústico para llamar la atención a equipos de búsqueda o personas que pudieran estar en los alrededores. También dispone de una serie de leds que informan al conductor, indicando la operatividad del sistema y en concreto si el sistema está en el arranque, en funcionamiento correcto, en funcionamiento activo pero con error de sensor, en funcionamiento activo pero con error de airbag, inactivo por error sin funcionamiento.

Con el objetivo de usar el propio mecanismo como un elemento de seguridad activa y para evitar los vuelcos, en el sistema se ha incorporado un programa que evalúa el riesgo de vuelco y, cuando este existe, se lo indica al conductor, avisándole de que el ángulo de inclinación del tractor se aproxima al de vuelco, de manera que el tractorista puede actuar y estabilizar su tractor antes de que el tractor alcance el ángulo de activación del sistema.

Todo el sistema se coloca en una caja de control, situada estratégicamente, de tal forma que soporte la intemperie, y conectada a la batería del vehículo (aunque dispone de una pila interna de tal forma que garantice corriente suficiente en caso de fallo de la misma por impacto), al sistema de activación (el cual se deriva a la llave de contacto, aunque existe la posibilidad de anularlo por avería o emergencia), a los sensores relativos al conductor (asiento y cinturón), y a las conexiones del air-bag.

Todos los dispositivos están en la caja, con lo que se minimiza la probabilidad de daños producidos por la intemperie o por operaciones de mantenimiento en el propio vehículo y se facilita el montaje al interactuar con menos elementos externos, si bien se podría hacer una réplica de los leds y del zumbador a otra parte del vehículo que estuviera más visible para el conductor.

5.5.1. [Sensor de presencia del conductor en el asiento](#)

Existe un debate sobre la posibilidad de desactivación del sistema de despliegue en caso de que el tractorista no se haya abrochado su cinturón de seguridad.

La desventaja de esta desactivación es que en el caso de que un tractorista volcase sin llevar abrochado el cinturón, volcaría con un tractor sin ROPS. Además se incumpliría el Real Decreto 1215/97. Otro aspecto a tener en cuenta es que antes de que el tractor alcanzase el ángulo de activación, el tractorista reduciría tanto la presión sobre el sensor del asiento que inutilizaría el sensor y convertiría el tractor, en el momento del vuelco, en un tractor sin ROPS. Un punto a tener en cuenta es que un tractorista sin cinturón podría invadir la zona de despliegue de la AD-ROPS en el momento de la activación. La norma ANSI/ASABE S599 no prescribe la utilización de cinturón de seguridad en los vehículos para los que es aplicable.

Los dos riesgos son lo suficientemente importantes para aconsejar diseñar el sistema de activación de manera que el tractor no pueda funcionar sin una repuesta positiva de los dos sensores, tal y como se hace en las embarcaciones en las en caso de que el patrón abandone su puesto el motor debe parase (sistema “hombre al agua”).

Aunque en mi opinión el riesgo más importante es el de un tractorista que trabaja sin cinturón de seguridad, el diseño del sistema de activación se ha realizado de forma lo suficientemente flexible para que el fabricante seleccione una de las opciones citadas.

5.5.2. [Interruptor de encendido](#)

La razón por la que se ha asociado la activación del sistema a la llave de contacto es garantizar su operatividad durante el funcionamiento normal del tractor, evitando que el sistema pueda ser desactivado por el tractorista de forma manual y también el despliegue accidental durante operaciones de mantenimiento que puedan necesitar inclinar el tractor pero en estas operaciones no requiere que el sistema esté arrancado.

Se ha incluido un interruptor, asociado a la llave de contacto del vehículo, para habilitar el sistema para su funcionamiento. Además de dar paso a la corriente eléctrica, habilita la carga de un dispositivo a base de acumuladores de energía para que en caso de pérdida de la batería principal en el impacto producido por el accidente de tráfico, los disparadores puedan seguir funcionando, al menos durante 6 segundos después del impacto. De esta forma, el sistema sigue operativo, durante este tiempo, en caso de corte de corriente.

5.5.3. [Verificador de continuidad en la línea de activación del inflador](#)

La intensidad y el tiempo máximo son de 0,4 A y 6 segundos, respectivamente. Sin embargo, como es conveniente minimizar estos parámetros, se ha elegido una intensidad de 0,1 A, durante 1 segundo, que son suficientes para la detección de la continuidad. Para ello se ha instalado una resistencia en serie de 50 ohmios porque la tensión interna del microprocesador es de 5 V.

5.5.4. [Microcontroladores](#)

En las primeras fase del desarrollo se usó el microcontrolador BX35, integrado en el sistema LCDX porque dispone de un display que facilita la lectura de los datos proporcionados por los distintos sensores y, además, como dispone de 8 optoacopladores permite suministrar tensiones de 12 V, que es la habitual en vehículos a motor, a todos los sistema del inclinando sin necesidad de poner relés auxiliares.

Sin embargo, en los ensayos definitivos se ha elegido el sistema BX24 porque tiene un tamaño mucho más reducido por poder ser montado en una pequeña placa base diseñada específicamente. Además su consumo es más bajo y dispone de un mayor número de puertos E/S que el LCDX. Dispone de 16 puertos de E/S, 8 de los cuales son analógicos, mientras que el LCDX no tenía suficientes puertos para todos los sensores necesarios.

5.5.5. Algoritmo de control

Ya hemos visto que el microcontrolador requiere una programación, que analice los datos en tiempo real, y tome la decisión adecuada a cada caso. Al tratarse de un dispositivo de seguridad, tiene elementos redundantes, así como mecanismos de verificación de los sensores, de tal manera que si detecta una anomalía, lo indica para que pueda ser llevado a servicio técnico y revisado.

El principio básico de diseño es que el sistema debe activarse en caso de riesgo inminente de vuelco y sólo en este caso. Por lo tanto, es necesario hacer un análisis de las distintas situaciones que se pueden dar y desarrollar el programa de control. El sistema debe tener cumplir los siguientes requisitos:

- **Activación del sistema:** el sistema debe analizar si está en modo operativo o no, por lo que en el arranque, verificará que no está en un ángulo elevado (prefijado a 30°) ya que se puede entender que si estuviera en esta posición, está en modo de mantenimiento (por avería) y no debe activarse.
Asimismo, el sistema también debe estar en modo activo, en los 6 segundos posteriores al fallo de la corriente principal de la batería, para evitar que un impacto o daño en la batería dejara al sistema no operativo.
- **Coherencia de datos:** debido a que es un sistema de seguridad, se ha optado por la colocación de tres sensores en cada eje, y el sistema analiza tanto variaciones bruscas de inclinación (o picos), para corregirlos, así como el valor medio de los sensores, detectando variaciones anormales de uno respecto a los otros dos y, en ese caso, anulándolo.
- **Detección de falsos positivos y falsos negativos:** el sistema debe evitar tanto activaciones por errores del sistema (falsos positivos) como no activaciones en situación de vuelco real (falsos negativos). Para ello se utilizan tres sensores, para evitar que el daño de uno altere el resultado, con lo que al menos dos de los tres deben dar la misma orden para que se active el sistema, evitando que si uno de los sensores falla, el sistema se active de forma involuntaria (entendiendo que es muy improbable que fallen de forma simultánea dos de tres sensores).

- Sistema redundante: ante la remota posibilidad de fallo de un sensor o un inflador, se han dispuesto dos infladores con sistemas independientes verificables y tres sensores. En caso de fallo de un inflador o un sensor, el sistema sigue operativo e indica esta circunstancia.

La programación se ha realizado de tal forma que, en el caso de fallo de un segundo sensor, se priorice el falso positivo al falso negativo, es decir que baste con la indicación de uno solo de los sensores para que la AD-ROPS sea desplegada.

- Aviso al conductor: El conductor tiene que tener consciencia de la operatividad del sistema, aunque sin exceso de información, pues debe estar atento a la carretera o a su trabajo. Para ello, se han colocado tres leds de colores verde, amarillo y rojo, que indicarían la operatividad del sistema, el peligro de vuelco y la activación del sistema, respectivamente.

El peligro de vuelco también es indicado con una señal acústica y el parpadeo en el led verde indica la necesidad de acudir al servicio técnico aunque el sistema esté operativo.

La figura 77 muestra el idiograma de operatividad del sistema.

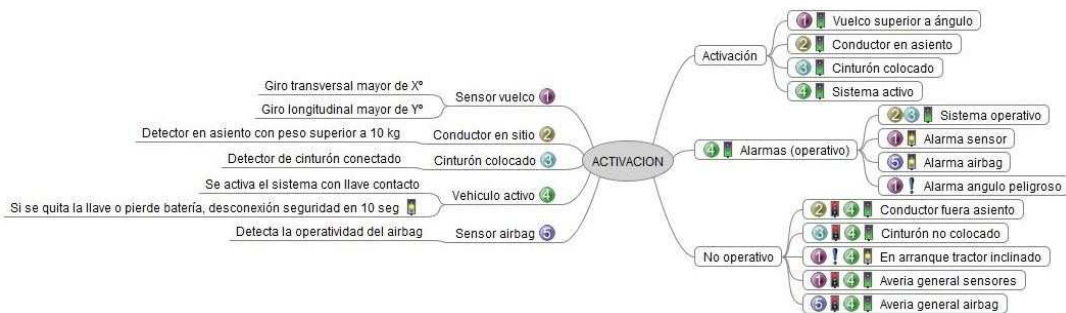


Figura 77.- Idiograma de operatividad del sistema

5.5.5.1. Esquema de conexionado del sistema

Para realizar este sistema, se debe conectar el microprocesador a los distintos elementos, de tal manera que pueda analizar de forma adecuada

Los distintos puertos de conexión del microprocesador son:

- 1: Sistema de conexión por puerto COM con ordenador
- 2: Sistema de conexión por puerto COM con ordenador
- 3: Sistema de conexión por puerto COM con ordenador
- 4: Sistema de conexión por puerto COM con ordenador
- 5: Emisión de señal el verificación de continuidad del disparador 1
- 6: Emisión de señal el verificación de continuidad del disparador 2
- 7: Recepción de señal para verificación de continuidad de los disparadores
- 8: Sistema de alarma acústico.
- 9: Led verde (indicación sistema correcto)
- 10: Led ámbar intermitente
- 11: Led rojo alta intensidad y/o intermitente
- 12: Sistema activación. Requiere relé para garantizar potencia suficiente.
(incluye sistema localización emergencia
- 13: Sensor 1 (ángulo X)
- 14: Sensor 2 (ángulo X)
- 15: Sensor 3 (ángulo X)
- 16: Sensores conductor
- 17: Sensor 1 (ángulo Y)
- 18: Sensor 2 (ángulo Y)
- 19: Sensor 3 (ángulo Y)
- VCC: Esta entrada tiene un sistema de acumulación de energía tipo pila, la cual garantiza que tras eliminar la tensión eléctrica de la batería, se proporcione energía durante 6 segundos.

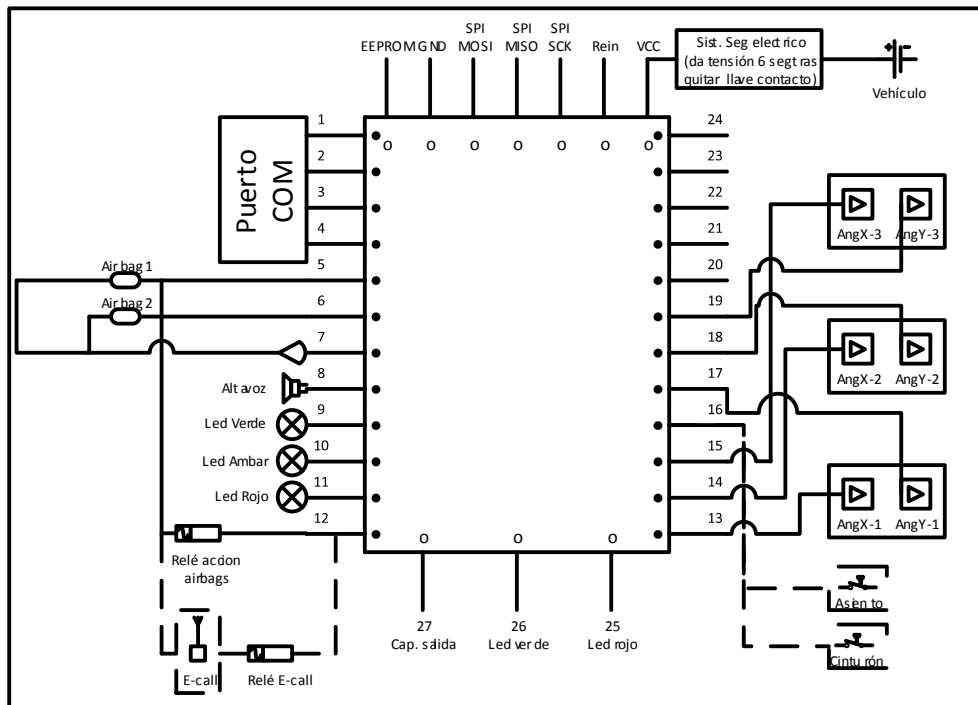


Figura 78.- Esquema de conexiones del sistema

5.5.5.2. Diagrama de bloque

El sistema consta de cuatro bloques principales:

- Arranque
- Control conductor
- Detección de vuelco
- Activación

Estos bloques tienen una función específica y a su vez están relacionados, de tal manera que verifican

En la figura 79 se representa el algoritmo principal del microprocesador.

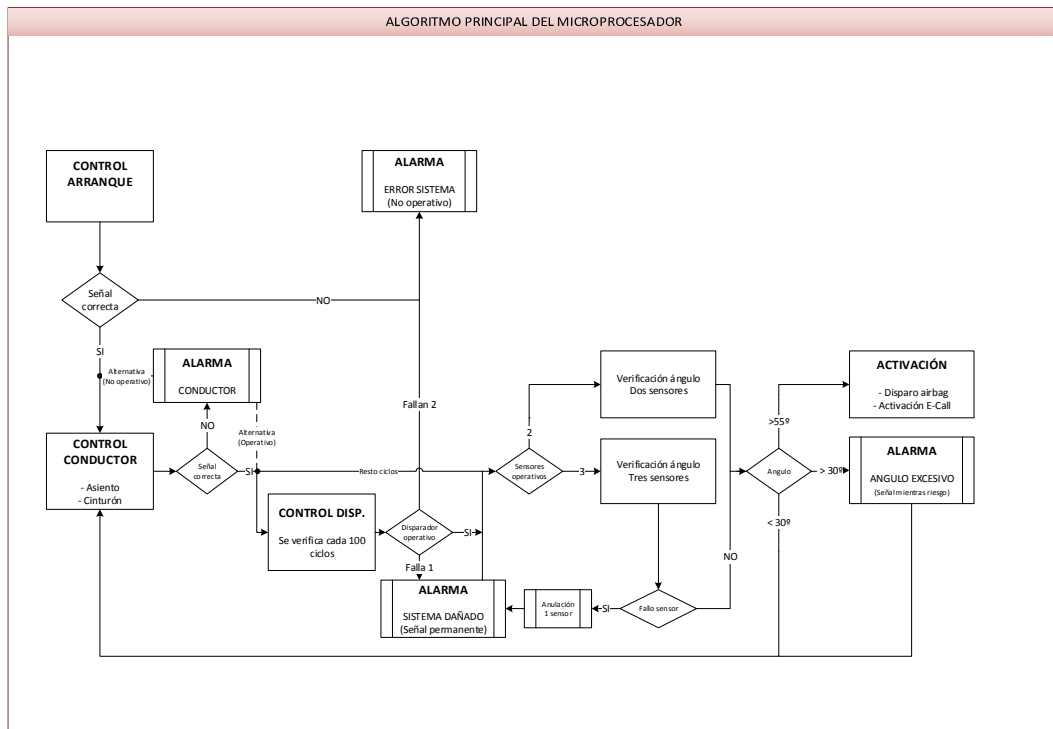


Figura 79.- Algoritmo principal del microprocesador

5.5.5.3. *Bloque de arranque*

En el bloque arranque se incluyen el dispositivo de operatividad del sistema en los seis segundos posteriores al fallo de la batería, el sensor de ángulo de inclinación y el de verificación del estado de los infladores. En este bloque también está el interruptor de conexión, asociado a la llave de contacto.

En el momento del encendido, analiza durante un tiempo determinado (diez segundos en nuestro caso) si el sistema está en situación de vuelco (lo que podría producirse en caso de golpe en los sensores que los hubieran desplazado). En estas circunstancias, el sistema no debe ser operativo, ya que se pondría en funcionamiento el vehículo con una inclinación superior a la de vuelco real. En este caso, el sistema se bloquea hasta su reinicio, evitando la activación, pero si se comprueba que el sistema está correcto durante este tiempo, inicia la operatividad. Junto a esto se activa una alarma para que el conductor sepa que el sistema no está operativo.

El tiempo se ha considerado que sea de 10 segundos, ya que se aprovecha para que los distintos leds parpadeen, así como que el zumbador funcione, con lo que el conductor podrá verificar su operatividad. Si el conductor observará que existe una anomalía en las luces o el sensor, puede llevar el sistema para su revisión y reparación.

Si el sistema es operativo, se activa el siguiente bloque, que es el de control del conductor

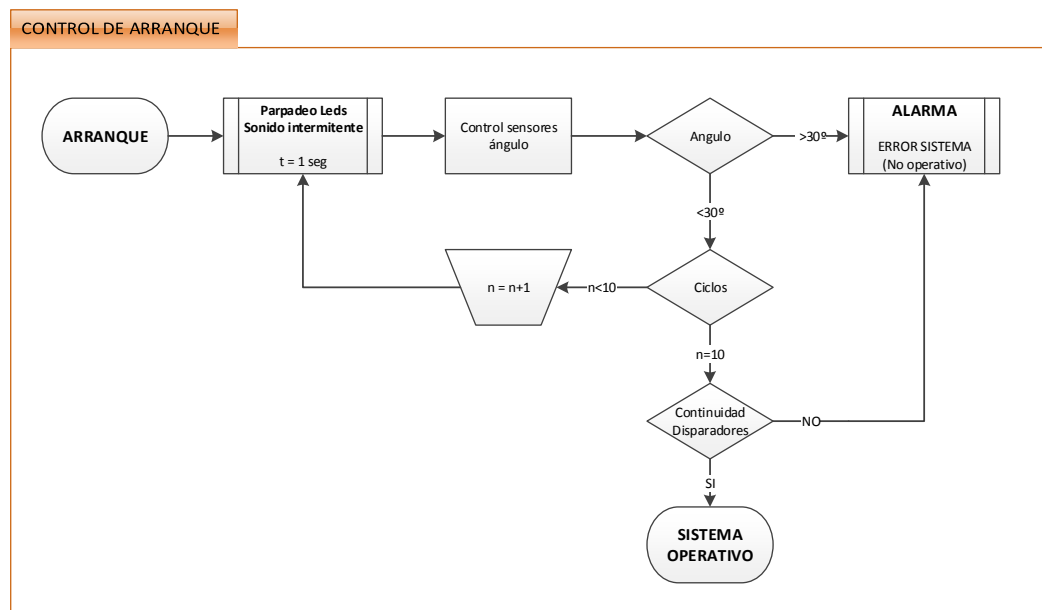


Figura 80.- Algoritmo control de arranque

5.5.5.4. Bloque de conductor

En el bloque de detección del conductor están los sensores de presencia del tractorista en su asiento y el del cinturón de seguridad. En el caso de una de estas dos circunstancias no concurra, se activa un indicador luminoso de error del sistema. Dependiendo de la legislación, así como del tipo de vehículo y de las necesidades, está considerado que se puedan programar varias alternativas

- Alternativa 1: Bloqueo del sistema si falla un sensor. Es la alternativa más segura de funcionamiento y a la vez la más restrictiva, ya que se garantiza que el conductor está en el asiento antes del despliegue de la E2D-ROPS. Sin embargo, en caso que el conductor no lo tuviera abrochado, o bien no notara

que hay presión en el asiento (debido a que se ha sentado sobre el cinturón abrochado pero realmente no es efectivo el mismo y se está resbalando), evita el disparo, por lo que no hay riesgo de que en su activación lesione al conductor. Tiene como contra que en caso de vuelco el tractor funciona como un tractor normal sin ROPS de seguridad, por lo que el operario o bien sale despedido o bien existe el riesgo de atrapamiento en caso de vuelco. El sistema activaría una alarma indicando que el sistema no es operativo.

- Alternativa 2: Sistema operativo si falla algún sensor. En este caso se entiende que los sensores pueden fallar, pero aunque se activaría una señal de alarma, el sistema sería operativo, con el conocimiento del conductor.
- Alternativa 3: Bloqueo del sistema si falla el sensor del asiento, pero indicación de alarma si falla el sensor de cinturón. Esta modalidad está relacionada con lo marcado en la norma americana ANSI/ASABE S599 en el cual el uso del cinturón es voluntario pero el sistema tiene que desconectarse si no detecta que el conductor está sentado. Sería una mezcla entre las dos alternativas anteriores, asociada bien a una alarma de cinturón, y bien a una desconexión del sistema asociada al sensor del asiento.

Respecto a esta alternativa, que si bien se pone por criterios de la norma, habría que analizar si un vehículo que está inclinado a más de 50° el conductor si no llevara el cinturón puesto, estaría en posición estable o bien se estaría resbalando del mismo, por lo que no está claro si ejercería suficiente presión en el mismo para que el sensor del asiento lo detectara, por lo que puede que no se activara en el caso de vuelco

Además, hay que tener en cuenta que en futuros desarrollos, esta alarma podría ir asociada a una desconexión parcial del vehículo, impidiéndole superar una cierta velocidad, extender elementos que pudieran poner en riesgo la estabilidad del vehículo o similar.

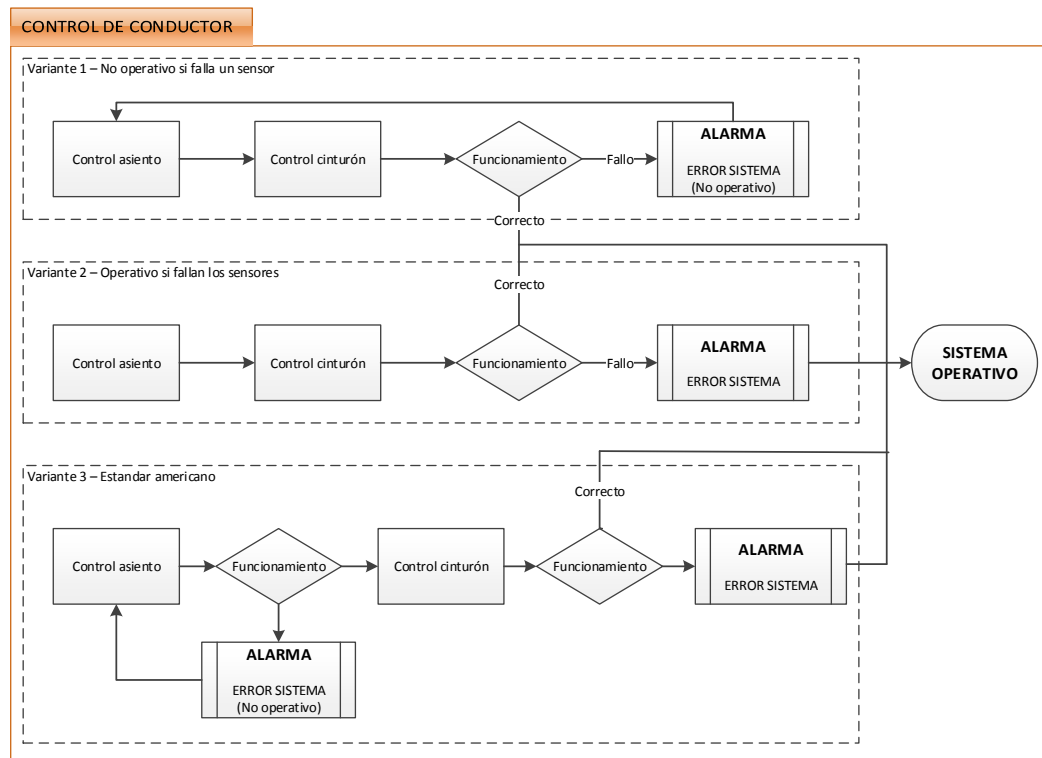


Figura 81.- Algoritmo control del conductor

5.5.5.5. Bloque de detección de vuelco

En el bloque de detección de vuelco están situados los tres sensores de inclinación (de doble canal) y es la base del sistema de seguridad. Para evitar los falsos positivos y, sobre todo, los falsos negativos, el sistema de control ha sido programado para que la activación requiera la recepción de, al menos, dos de las tres señales positivas de los sensores de vuelco.

El motivo es que si hay un falso positivo, se entiende que será en uno de los sistemas y los otros dos no se activarán, y si es un falso negativo, no impediría la activación del sistema aun cuando los otros dos si considerasen el vuelco.

Esta señal defectuosa puede producirse como pico ya que hay que entender que son elementos electrónicos y mecánicos y una vibración puede generar un error, por lo que además, se ha previsto un filtro de seguridad en el cual en cada lectura no se permitirá un incremento de ángulo superior a los 5°, lo que equivaldría (considerando que las mediciones se efectúan como máximo cada 10 ms) a 500°/s como máximo, lo

cual observamos que para el caso de un vuelco de un tractor es suficientemente amplio el margen.

También se ha tomado como posibilidad que uno de los sensores tenga una avería permanente (debido a fallo eléctrico, mecánico, o bien porque se suelta y no lee de forma correcta), por lo que se compara su valor con los otros dos sensores, y si el error se repite en 10 ciclos, este sensor se desconecta de forma permanente, indicando la existencia de una avería, y dejando el sistema operativo con los dos sensores.

En este caso, ya que en caso de diferencia entre los sensores el sistema no sabría si se encuentra ante un falso positivo o un falso negativo, si uno de los sensores detectara un valor superior al ángulo de activación, se prioriza el disparo sin ser necesario (falso positivo) a que el sistema no actúe cuando lo es (falso negativo), por lo que el conductor seguiría estando protegido por el sistema.

En la tabla 16 se analizan las distintas posibilidades de funcionamiento, si bien no importa el orden de los sensores, en donde se observa el comportamiento del sistema si falla uno de los sensores (tanto de forma puntual como de forma fija).

SISTEMA	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	OBSERV.
No activo	0	0	0	
No activo	1	0	0	1 FALSO POSITIVO
Activo	1	1	0	1 FALSO NEGATIVO
Activo	1	1	1	
No activo	0	0	DESC	
Activo	1	0	DESC	POSIBLE FALSO
Activo	1	1	DESC	

Tabla 16.- Tabla de activación del sistema

0: El sensor indica que el sistema no está volcando

1: El sensor indica que el sistema está volcando

DESC: El sensor está averiado y por lo tanto no afecta su valor al resultado

Como podemos observar, el sistema prioriza la activación del sistema si el incluir los tres sensores en vez de uno disminuye en gran parte la posibilidad de errores.

Si bien no se ha indicado, se debe realizar en los dos ejes, ya que el vuelco puede ser lateral (el más probable) pero también delantero o trasero, por lo que el sistema se duplica (para ambos ejes), aunque tiene la misma filosofía.

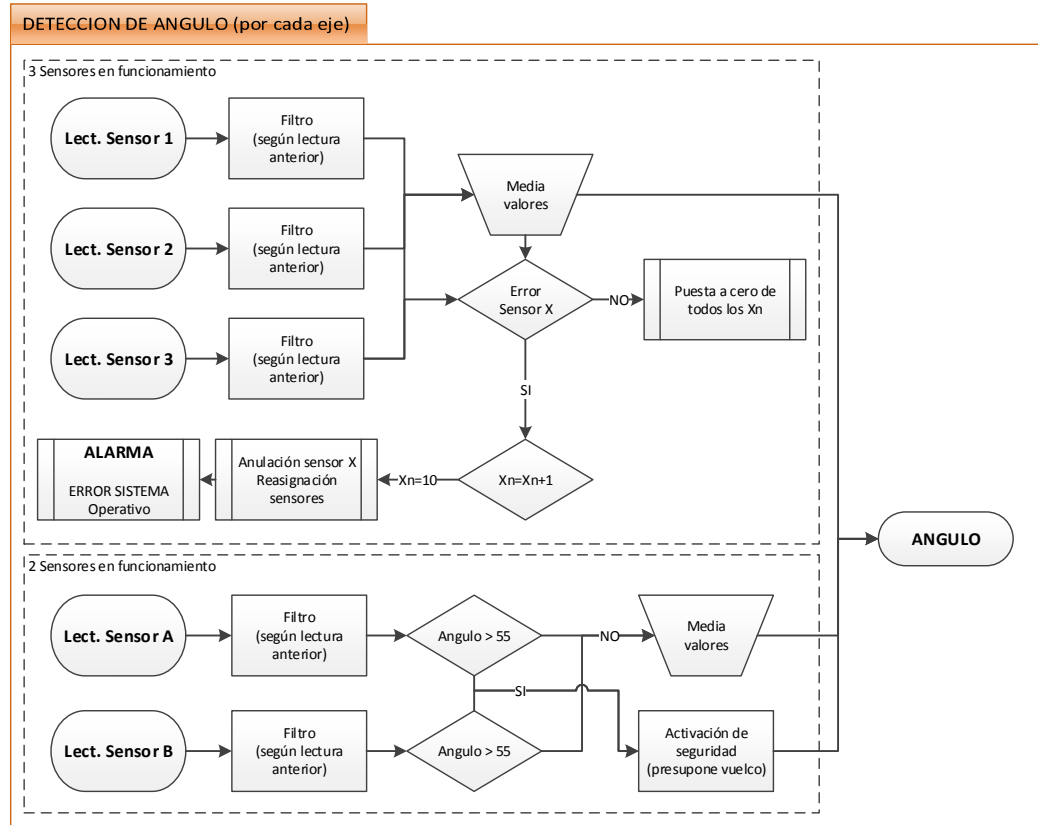


Figura 82.- Algoritmo de detección del vuelco

5.5.5.6. Bloque de activación

El bloque de activación es aquel que interpreta la información del ángulo y el que produce la señal efectiva de activación del sistema, así como de la señal de alarma de ángulo peligroso. Esta señal tiene un contador para evitar que si estamos cerca del ángulo 30° parpadee de forma imperceptible, por lo que se garantiza que si llega momentáneamente a este valor o lo supera, el sistema dará una alarma de al menos un segundo, tiempo

Una ventaja de la señal de alarma a los 30° es que el conductor también puede verificar el funcionamiento del sistema de forma manual, ya que si observa que en caso de inclinación anormal no se activa o bien, que se activa la alarma de forma prematura, podrá sospechar que el circuito que lleva los sensores ha sufrido una desviación.

Otra ventaja de esta indicación prematura es que el conductor puede conocer cuando está conduciendo si está en un ángulo superior a los 30°, lo cual también es una manera de avisarle de forma prematura del riesgo que está corriendo, para que incremente las precauciones en la conducción, como sistema de seguridad activa, evitando con ello que entre en el ángulo de vuelco efectivo de vuelco y se tenga que desplegar la AD-ROPS

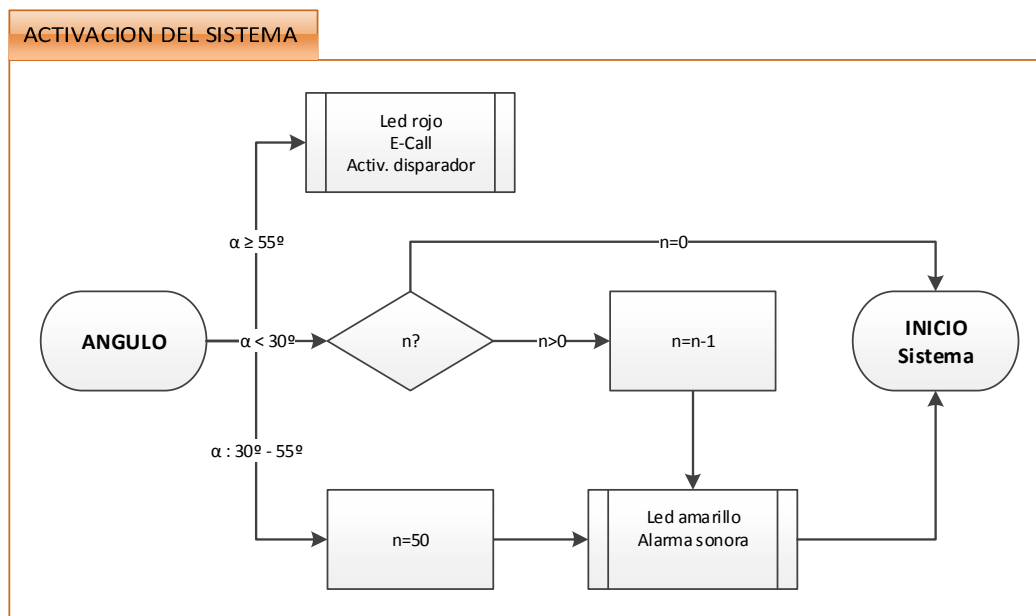


Figura 83.- Algoritmo de activación del sistema

Por motivos de seguridad, el sistema dispone de una fuente de energía auxiliar propia que puede proporcionar energía suficiente para que todo el sistema funcione al menos durante 6 segundos. El motivo de esta batería es que hay que considerar la circunstancia que el vehículo tenga un accidente de tráfico por impacto y se dañe la batería general del vehículo, por lo que tendría que tener suficiente energía para activar el mecanismo.

Asimismo también está asociado a la llave de contacto, ya que en caso de accidente, pero sin vuelco, los equipos de emergencia tienen que tener posibilidad de trabajar en condiciones de seguridad, y en la operación de rescate podrían mover los sensores provocando una situación de activación, por lo que se ha optado por una anulación del sistema si durante 6 segundos no recibe tensión eléctrica. Su filosofía es similar al funcionamiento de los airbags de los vehículos automóviles, en los cuales tras una colisión parcial en la que no se hayan activado, se debe retirar la llave de contacto para que se desactive el sistema transcurridos entre 6 y 10 segundos.

5.5.6. Sistemas complementarios de alarma

Los distintos bloques incluyen señales indicativas del estado de operatividad del sistema. Para ello se ha considerado tres leds luminosos (rojo, ámbar y verde) así como un indicador sonoro. Además hay opción de poner un sistema de radiobaliza de emergencia denominado e-Call para facilitar la locación del vuelco.

En la tabla 17 se explica los distintos estados de alarma:

- Led verde: Indica operatividad
- Led ámbar: Indica alarma (asociado alarma sonora)
- Led rojo: Indica no operatividad
- Sirena: Indica situación de alarma
-

	Led V	Led A	Led R	Sirena
Verificación sistema	P	P	P	P
Operativo correcto	1	0	0	0
Operativo sensor averiado	P	0	0	0
Operativo airbag averiado	P	0	0	0
Operativo cinturón de seguridad desconectado	P	P	0	0
No operativo por anulación cinturón seguridad	0	1	P	P
Operativo conductor fuera asiento	P	P	0	0
No operativo por anulación conductor fuera asiento	0	1	P	P
No operativo por no verificación arranque	0	P	1	P-15
No operativo por avería general	0	P	1	P-15
Alarma ángulo peligroso	1	P	0	P
Sistema disparado	P	P	1	P

Tabla 17.- Indicación de leds y alarma sonora

La leyenda es:

- 0: Apagado
- 1: Encendido
- P: Parpadeo
- P15: Alarma sonora durante 15 segundos, y posteriormente se acaba

Hay que tener en cuenta que en función de la configuración del algoritmo será una programación de alarmas u otras

En caso de disparo del sistema, puedo ir asociado un sistema remoto de aviso y localización (denominado “e-Call”), con lo que en caso de vuelco, el centro de coordinación de emergencias recibiría el aviso, así como la localización del incidente, ya que aunque el sistema está diseñado para que el conductor no sufra daños en caso de vuelco, estos sean debidos a aplastamiento, y de manera similar a lo que sucede en los coches, el vuelco puede que impida que algunos conductores puedan salir por sus medios o bien estén alejados, lo que minimizaría el tiempo de las asistencias para verificar su estado.

Los distintos bloques incluyen señales indicativas del estado de operatividad del sistema. Para indicar la presencia del conductor en su asiento y el estado del cinturón de seguridad se han dispuesto dos indicadores de color rojo. Para avisar del riesgo de vuelco se han unificado todos los sensores en un único indicador de color amarillo ámbar que puede estar asociado a una alarma sonora. El indicador de funcionamiento del sistema está formado por dos indicadores, verde y rojo que indican si el sistema es operativo o no, con lo que tanto el tractorista como otros usuarios (mantenimiento, equipos de emergencia) pueden conocer el estado del dispositivo.

5.6. Resultado de los ensayos

Para verificar el funcionamiento del sistema se realizaron varios ensayos y el último fue un vehículo real.

5.6.1. Pruebas realizadas con el microprocesador BX-35

Las primeras pruebas se realizaron implementando el algoritmo en el microprocesador BX-35, cuya desventaja es que este microprocesador no tiene tantas entradas y salidas, si bien tiene la ventaja de disponer de una pantalla led, así como de un zumbador integrado, por lo que a la hora de verificar el funcionamiento del algoritmo, es mucho más sencillo.

En primer lugar se implementó un algoritmo más sencillo, con un solo sensor (no se tenía en cuenta el sistema redundante de seguridad con los tres sensores) para verificar su velocidad de procesamiento, así como las indicaciones luminosas y sonoras.

Se incluyó una modificación también en el algoritmo, para que en la pantalla apareciera el ángulo que marcaba el sensor, así como los distintos estados de alarma y activación.

Las pruebas consistían en girar el sensor respecto a una plataforma, y comprobar el valor del ángulo con el marcado en la pantalla del microprocesador, observándose que a pequeños ángulos el resultado si era el esperado, pero con grandes variaciones aparecía un error, por lo que se decidió modificar el algoritmo utilizando para ello una curva cuadrática de tal forma que minimizara el error.

Una vez realizado esta modificación, se observó que no había variaciones apreciables entre el ángulo detectado por el sensor y el real y que ante golpes y vibraciones, el sistema era estable y no activaba el modo de disparo, tal y como se observa en la figura 84

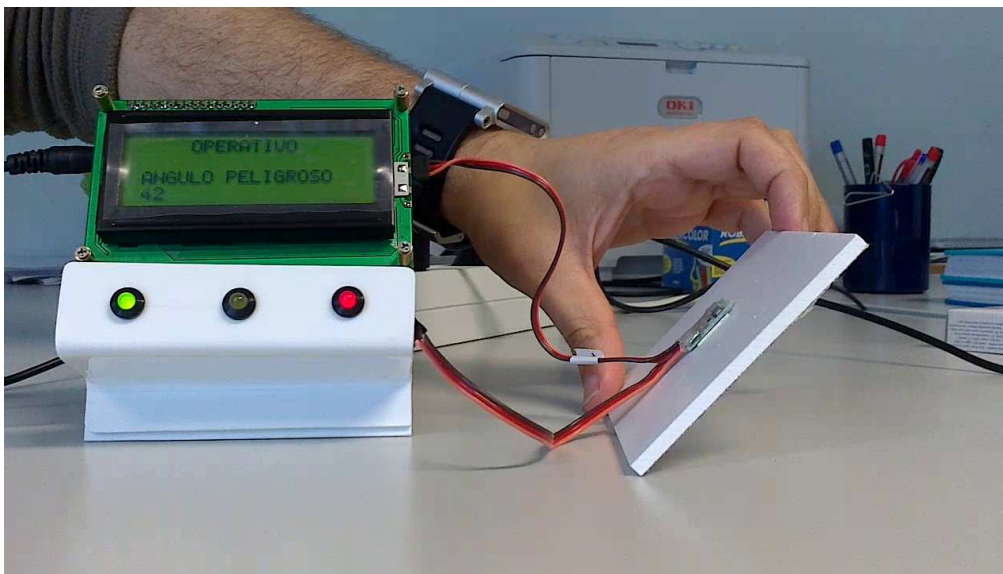


Figura 84.- Comprobación del microprocesador BX-35 con un sensor

En una segunda prueba, se instalaron ya los tres sensores, si bien sólo en un eje, ya que no era posible realizarlo en dos ejes debido a la falta de conexiones disponibles. En este caso se quería comprobar el funcionamiento del algoritmo completo en un solo eje, y en la pantalla se observaba los ángulos que marcaban los tres sensores.

Fue necesario realizar pequeñas modificaciones en las calibraciones de los sensores ya que no son exactamente iguales, y como el sistema compara el valor relativo de los tres, en giros bruscos se generaban problemas (giros que superaban los 500°/s) por lo que se procedió a realizar los pequeños ajustes en todos los sensores para que el valor fuera el mismo.

Ya con los sensores correctamente calibrados, se probó a dar distintos ángulos para ver si activaba tanto la alarma de ángulo de peligro (30°), como la activación en caso de ángulo de vuelco (55°), con resultados positivos en todos los casos.

Otras de las pruebas realizadas fue el crear vibraciones en un sensor, de tal forma que generasen picos que pudieran generar pequeñas variaciones en los datos de un sensor. Estas vibraciones se produjeron con un pequeño motor al cual se le acopló una leva excéntrica de tal forma que golpeará una pequeña caja de metacrilato en la cual estaba puesto el sensor de tal forma que se podía variar tanto la potencia como la frecuencia. Para poder garantizar en que momento producirlos, se conectó el

microprocesador a un PC de tal forma que la información en tiempo real de todos los sensores apareciera en pantalla en listado (así como de todas las variables que pudieran interesar), junto a un retraso en los tiempos de adquisición de datos, pasando los mismos a ser de segundos, para que de esta manera fuera más sencillo el generar estas anomalías.

Los datos que se visualizaban eran

- Valor ángulo sensores
- Valor ángulo media
- Valor desviación sensores
- Valor número de errores (error es cuando un sensor tiene un valor que difiere de la media en 3 grados)
- Estado del sensor (activado o desactivado)
- Estado de activación (alarma, activado)
- Estado de avería

También se aprovechó para desactivar de forma permanente un sensor y ver como realizaba los cálculos sin tomar en consideración el sensor desactivado, así como cuando se producían los distintos estados de alarma.

Por último se hizo la comprobación de ver como se comportaba el sistema ante la señal de falta de cinturón (ya que la señal de falta de presión en el asiento es similar y se optó por sólo una de ellas para el caso más sencillo) y se simuló el caso de bloqueo del sistema o bien sólo de alarma avisando de la no colocación del cinturón.

Tras las diversas pruebas se comprobó que el resultado del algoritmo era coherente, ya que se hicieron las siguientes comprobaciones (utilizando la pantalla led del microprocesador).

- Análisis del ángulo detectado por los tres sensores
- Activación de alarma de ángulo con tres sensores
- Activación de disparo con tres sensores
- Anulación de sensor por avería con activación alarma mal funcionamiento
- Análisis del ángulo total detectado por dos sensores

- Activación de alarma de ángulo con dos sensores
- Activación de disparo con dos sensores
- Activación de alarma de cinturón no colocado
- Bloqueo del sistema con cinturón no colocado

5.6.2. Pruebas realizadas en laboratorio con el inclinando

Comprobado ya el funcionamiento en la primera fase, se pasó a la segunda fase, en la cual se implementan ya los tres sensores en los dos ejes (seis señales) ya en el microprocesador BX-24, el cual si bien no tiene pantalla led, si tiene la ventaja de disponer de numerosas entradas y salidas, así como un menor tamaño, por lo cual es más sencilla su implementación en las pruebas de campo

Para facilitar el montaje, se realizaron pruebas en un caja desmontable en vez de integrarlo dentro de la estructura, tal y como se ve en la figura xxx



Figura 85.- Prototipo de inclinando (a) cerrado; (b) abierto

En la tapa se dispusieron los tres sensores, de tal manera que se pueda girar la caja simulando que es el tractor en los distintos ejes

Inicialmente se conectó este sistema a un PC de tal manera que se verificaban los datos, tal y como se hizo con el microprocesador BX-35, realizando pequeñas modificaciones en el algoritmo ya que ahora están todas las señales activas. Ya dentro de la caja se colocan los diodos luminosos así como un zumbador que funciona como alarma sonora. Este sistema también tenía un interruptor de encendido, así como con

una conexión externa de tensión de 12 V, si bien en las primeras se utilizaba una pila interior para simular la batería de emergencia.

Respecto a las salidas externas, se colocaron dos a través de un relé de alta velocidad, lo que permitía que fueran dos señales, una de ellas hacia el airbag (si bien las primeras pruebas eran con una bombilla para comprobar el funcionamiento) y el segundo activado a un cronómetro digital, con lo que se podía comprobar a través de una cámara de alta velocidad el tiempo que se tardaba en activar desde que se simulaba la situación de vuelco hasta el disparo efectivo.

Fue en esta fase en donde se realizaron algunas pruebas de funcionamiento con el airbag, comprobando además los tiempos de activación.

Para ello se dispuso de una tapa abatible sobre un eje dispuesto encima de la caja, y detrás un transportador de ángulos centrado en el eje de la tapa, de tal manera que se pueda observar el incremento del ángulo, lo cual simula el ángulo en el cual se encontraría el tractor y así se puede evidenciar cual es el comportamiento del inclinando, tal y como se observa en la figura 86

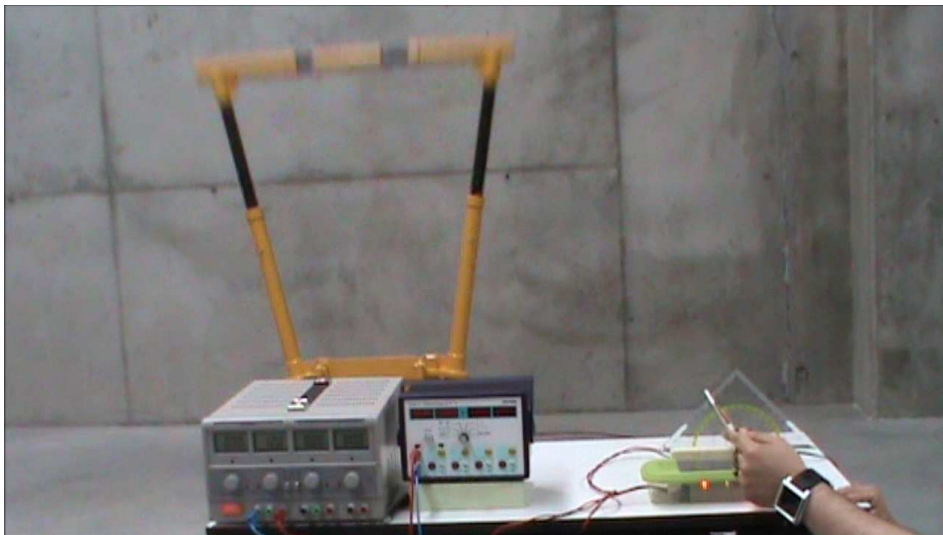


Figura 86.- Prueba del inclinando en laboratorio al llegar a un ángulo determinado

Durante estas pruebas se observa que las señales de alarma son correctas y la señal de activación se manda de forma correcta, pero que la energía proporcionada por la pila de 9 V que hay en su interior no produce suficiente energía para la activación de los airbag, por lo que siempre es necesario que se disponga de una batería pequeña auxiliar para que pueda proporcionar la energía necesaria mientras que la pila se mantenía para que el sistema pudiera funcionar de forma autónoma durante las pruebas.

5.6.3. Pruebas realizadas en quad con el inclinando

Tras el análisis en el laboratorio, se instala el inclinando en un quad, para comprobar su funcionamiento, tal y como se observa en la figura 87.



Figura 87.- Localización del inclinando en el quad

Tal y como se ha explicado, se colocó el quad con la AD-ROPS en la parte trasera y cableado con el inclinando en la parte delantera. La energía eléctrica se consigue gracias a través de la toma de mechero del propio quad, si bien por seguridad se le pone un interruptor en un lateral, de tal forma que se pueda activar o desactivar a voluntad, para evitar que durante el traslado del mismo se pudiera activar de forma accidental.

Se colocó el quad en una plataforma con capacidad de elevación sobre un eje, y se realizaron varias pruebas, tanto de vuelco lateral como de vuelco trasero para comprobar su funcionamiento. Durante estas pruebas se realizaron grabaciones de video, tanto desde fuera como del propio quad, de tal forma que se pudo analizar el funcionamiento de la estructura. Las grabaciones que se hicieron desde fuera se realizaron con una cámara de alta velocidad para comprobar en qué momento se disparaba y si estaba completamente desplegado en el momento del impacto contra el suelo.

Se puede observar en la secuencia que el sistema activa la AD-ROPS previo al vuelco y que para toca el suelo, ya está completamente desplegado, por lo que un tractorista que esté correctamente situado en la zona de seguridad estaría protegido

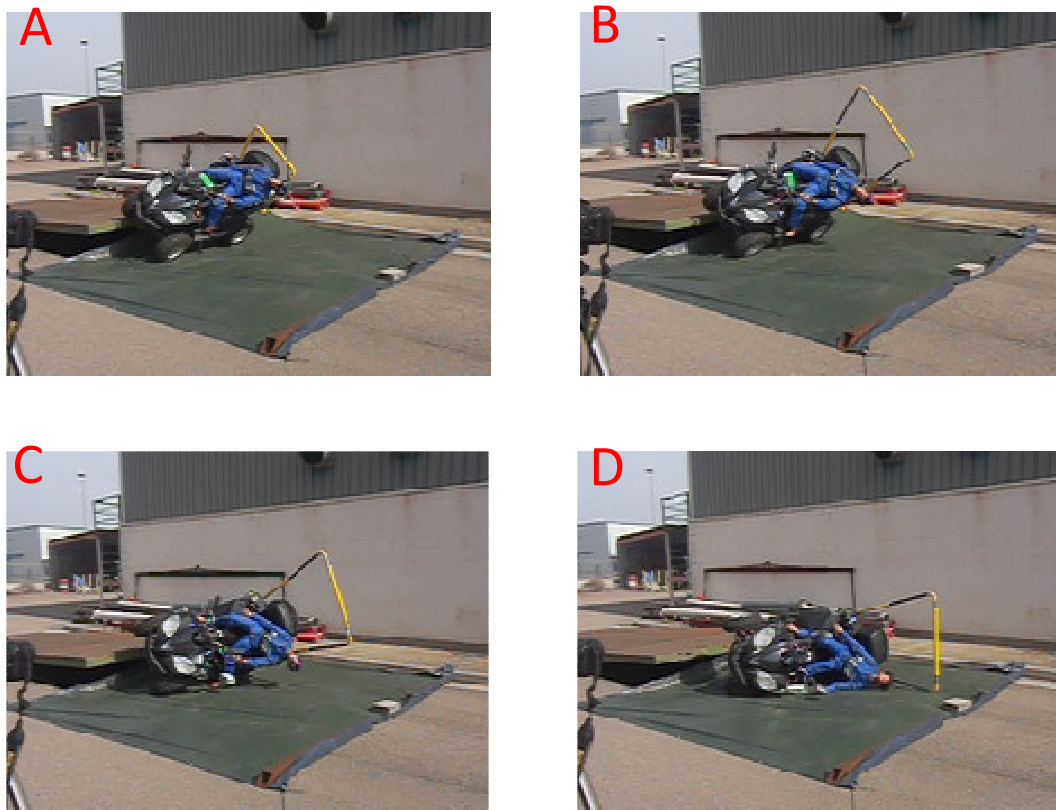


Figura 88.- Secuencia del vuelco del quad (a) momentos previos al vuelco; (b) detección de vuelco efectivo y disparo de la AD-ROPS; (c) extensión completa de la AD-ROPS antes de contacto con el suelo; (d) contacto con el suelo de la AD-ROPS.

Un detalle importante a tener en cuenta es que la estructura es válida siempre que el tractorista esté colocado durante el vuelco en la posición correcta que es con cinturón de seguridad y agarrado al volante con el cuerpo hacia el mismo ya que en caso contrario parte de su cuerpo estaría fuera de la zona de seguridad y por tanto no se garantiza que no sufra lesiones, si bien las mismas serían de menor consideración que en el caso de un vuelco completo con aplastamiento

6. CONCLUSIONES

Ha sido posible diseñar una ROPS, consistente en un arco delantero, automáticamente desplegable capaz de desplegarse en altura y anchura y bloquearse en su posición operativa por medio de infladores de airbags activados por sensores de vuelco y sin la intervención del tractorista. El sistema fue nombrado E2D-ROPS, que es el acrónimo inglés de ROPS desplegable en dos dimensiones.

Un prototipo del E2D-ROPS se ha construido, montado en un tractor y desplegado y bloqueado en su posición operativa, por medio de dos infladores situados en sus vigas inclinadas, activados por un inclimando, en tan sólo 102 ms. El mismo prototipo fue desplegado y bloqueado con un solo inflador situado en la viga transversal en sólo 312 ms. El sistema funciona correctamente porque en ambos casos el tiempo de activación es inferior al tiempo requerido del vuelco. Mediante la selección de los infladores, es posible seleccionar la velocidad de despliegue del E2D-ROPS.

Usando programas de ordenador de elementos finitos, ha sido posible calcular las secciones mínimas necesarias para las vigas del E2D-ROPS que permitirían obtener un resultado positivo en los ensayos del Código 6, así como calcular la masa de referencia máxima que se puede utilizar para un E2D-ROPS fabricado con vigas de una sección determinada, asegurando un resultado positivo de los ensayos del Código 6.

Ha sido posible desarrollar diferentes AD-ROPS para tractores T2 con diferentes tamaños y masas así como para equipos cortacésped. Se realizaron ensayos con las AD-ROPS en la EMA de acuerdo con el Código 6, con resultado fue positivo.

Ha sido posible seleccionar la potencia, el número y ubicación de los infladores utilizados para desplegar las diferentes AD-ROPS. En todos los casos, el despliegue y bloqueos de las AD-ROPS fueron lo suficientemente rápidos para ser efectivos. La mejor opción, en todos los casos, es la instalación de un inflador de airbag tipo SHI2-30V612 en cada una de las vigas inclinadas de las AD-ROPS, ya que es la opción más fiable.

A partir de los resultados de los ensayos del Código 6 sobre una AD-ROPS determinada, ha sido posible utilizar un programa gráfico en 3D para determinar los resultados de los ensayos del Código 6 realizados sobre un tractor determinado equipado con esa estructura. Además, el programa puede ser utilizado para cambiar de negativo a positivo el resultado de los ensayos, variando uno o más de los parámetros del tractor que afectan al resultado de los ensayos.

Se ha podido determinar el lugar geométrico de fijación de las AD-ROPS al tractor que garantizar tanto un resultado positivo de los ensayos del Código 6 como el cumplimiento de los requisitos de campo de visión.

Se ha podido demostrar, por medio de un ensayo de vuelco real en un quad equipado con una AD-ROPS y un inclinando, que la estructura se desplegó y se bloqueó mucho antes de golpear el suelo, sin invadir la zona de seguridad ni poner en peligro al conductor.

El ensayo real mostró que la AD-ROPS era capaz de proteger efectivamente al conductor del quad, en caso de vuelco lateral, así como en el caso de vuelco trasero, si el conductor permanece en su asiento con el cinturón de seguridad abrochado y con la cabeza apoyada en el volante.

Se ha podido desarrollar un algoritmo de activación para el inclinando que tenga en cuenta las distintas variables para evitar tanto los falsos positivos como los falsos negativos.

Se ha implementado este algoritmo en un microprocesador, probándolo en el vuelco del quad, así como en laboratorio, para analizar su respuesta, suponiendo varios errores en los sensores que pudieran darse, con resultado satisfactorio

7. DESARROLLO FUTURO

Como posibles vías de investigación como continuación de la presente tesis, se considera:

- Analizar si el sistema se debe activar o no en caso de que el conductor no lleve abrochado el cinturón de seguridad.
- Analizar la fuerza que ejerce un conductor sobre el asiento, en caso de vuelco si no lleva cinturón de seguridad, y si es efectivo lo indicado en la normativa americana ANSI sobre que sólo se debe activar si detecta al conductor en el asiento sin llevar el cinturón, o si realmente está desprotegido. En particular, es importante el análisis de esta fuerza para el momento en que el ángulo de inclinación del tractor se aproxima a los 60°.
- Analizar la normativa existente y cuestionar la necesidad que cada ROPS deba ser ensayado en cada tractor particular, cuando analizando un arco en un ensayo determinado y utilizando un software informático, es posible prever el resultado de los ensayos y determinar los puntos donde se puede fijar la ROPS asegurando un resultado positivo y reduciendo el coste de los ensayos y de la fabricación de las ROPS.
- Desarrollar una normativa específica para las AD-ROPS que tenga en cuenta los tiempos de despliegue y bloqueo, el sistema de infladores de airbag, las diferencias entre arcos de seguridad instalados por delante o por detrás del asiento y las distintas posibilidades del algoritmo de activación de las AD-ROPS.

ANEXO 1

LISTADO DE TABLAS Y FIGURAS

LISTADO DE TABLAS

- Tabla 1: Factores de riesgo en vuelco tractor (Arana et al. 2010)
- Tabla 2: Exigencias de las normas internacionales para ensayo de los cinturones de seguridad y sus anclajes
- Tabla 3: Características de los dos tractores
- Tabla 4: Características de los arcos de los dos tractores
- Tabla 5: Características del acero S275JR
- Tabla 6: Características de diseño de las AD-ROPS
- Tabla 7: Pruebas en distintas AD-ROPS usando varias configuraciones
- Tabla 8: Alturas mínimas necesarias que impiden la rodadura continua en función de la anchura superior del E2D-ROPS (la solución seleccionada se marca en negrita)
- Tabla 9: Deformaciones, energía total absorbida y estrés calculados en los ensayos lateral y trasero, correspondientes a los ensayos realizados en el E2D-ROPS, con secciones de diámetros 60 mm, 50 mm, 45 mm y 35 mm.
- Tabla 10: Máximas deformaciones y tensiones calculadas en diferentes E2D-ROPS para el ensayo lateral, variando las dimensiones de la estructura, así como de la masa de referencia.
- Tabla 11: Máximas deformaciones y tensiones calculadas en diferentes E2D-ROPS para el ensayo trasero, variando las dimensiones de la estructura, así como de la masa de referencia.
- Tabla 12: Deformaciones, energía absorbida y tensiones, calculadas en los ensayos de carga lateral y trasera, para una E2D-ROPS de dimensiones 80 x 70 y 65 x 55 mm
- Tabla 13: Máximas deformaciones y tensiones calculadas en diferentes E2D-ROPS para el ensayo lateral, variando las dimensiones de la estructura, así como de la masa de referencia.
- Tabla 14: Máximas deformaciones y tensiones calculadas en diferentes E2D-ROPS para el ensayo lateral, variando las dimensiones de la estructura, así como de la masa de referencia.
- Tabla 15: Tiempos de despliegue usando distintas combinaciones de inflador y de AD-ROPS

Tabla 16: Tabla de activación del sistema

Tabla 17: Indicación de leds y alarma sonora

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Tractor con arco de seguridad

Figura 2: Tractor con bastidor de seguridad

Figura 3: Tractor con cabina de seguridad

Figura 4: Ensayo de una estructura de protección por vuelco real (Uppsala. Suecia. 1956)

Figura 5: Ensayo dinámico

Figura 6: Ejes de rotación en el vuelco de un tractor (Márquez, 2012)

Figura 7: Zona de seguridad, definida por el Código 6

Figura 8: Simulación del plano del suelo según el Código 6

Figura 9: Zona de seguridad definida en el Código 7

Figura 10: Zona de seguridad definida en SAE J1194

Figura 11: Zona de seguridad definida en el Código 4

Figura 12: Energía que debe ser absorbida por la ROPS en el ensayo lateral, en función de la masa del tractor y la metodología de ensayo.

Figura 13: ROPS desarrollada utilizando el programa ESTREMA

Figura 14: Semieje trasero colapsado en accidente de tráfico

Figura 15: Tractor estrecho con arco de seguridad trasero

Figura 16: Arco abatible trasero

Figura 17: Elevación manual directa de arco abatible

Figura 18: Elevación de arco abatible con ayuda de palanca

Figura 19: Arco de seguridad plegable acoplable a la trompeta del tractor

Figura 20: Arco trasero con levantamiento asistido por ayuda mecánica

Figura 21: Motoreductor usado por Groothuis et al.

Figura 22: Equipo instalado en un tractor

Figura 23: Sistema de cambio de posición del arco trasero del Kubota M9540 LowProfile

Figura 24: Estructura y mecanismo de la AutoROPS

- Figura 25: AutoROPS en posiciones retraída y desplegada (Etherton et al., 2004)
- Figura 26: Pretensor de bloqueo automático
- Figura 27: Pretensor de bloqueo de emergencia (horizontal y vertical)
- Figura 28: Cinturón tipo ballesta
- Figura 29: Principales anclajes en los cinturones de dos puntos
- Figura 30: Cinturón de tres puntos sin pretensor, con pretensor y con guía y pretensor
- Figura 31: Posición de los puntos de anclaje del cinturón de seguridad
- Figura 32: Esquema de funcionamiento de la estructura de vuelco (Rains, 2000)
- Figura 33: Sistema de simulación de vuelco lateral. Prototipo turco
- Figura 34: Simulador de vuelco. Prototipo UPNA
- Figura 35: Sensor Smart Spud y ordenador manual
- Figura 36: Tractor Kubota SFM-82N y detalle de su arco delantero de protección
- Figura 37: Diagrama tensión-deformación del acero S275JR
- Figura 38: Detalle del entorno del programa “Vuelco3.xls”
- Figura 39: Modelado en 3D de John Deere 60C y Kubota M8200D con el E2D-ROPS
- Figura 40: Figura 40.- Detalle de tensiones sufridas en las distintas secciones del AD-ROPS, durante el ensayo de carga lateral, calculadas por el programa “ANSYS”
- Figura 41: Modelos de AD-ROPS construidas por la empresa AIR-ROPS NA 2012 S.L.
- Figura 42: Curvas de presión-tiempo de 15 infladores de la serie SHI2, fabricados por TRW (cortesía de TRW)
- Figura 43a: Gráfico de expansión para el inflador SHI2-20
- Figura 43b: Gráfico de expansión para el inflador SHI2-30
- Figura 44: Quad de prueba con detalle de la AD-ROPS montada y del inclinando
- Figura 45: Prueba de vuelco en quad
- Figura 46: Tractor embestido por camión en Tudela
- Figura 47: Sensor de inclinación utilizado
- Figura 48: Sensor de presencia del tractorista en su asiento
- Figura 49: Sensor de cinturón de seguridad
- Figura 50: Microcontrolador BX-24
- Figura 51: Esquema eléctrico del microcontrolador BX-24
- Figura 52: Microcontrolador LCDX
- Figura 53: Dimensiones del microcontrolador LCDX

- Figura 54: Placa de control Mini AtomBoard S310162
- Figura 55: Circuito de la placa de control Mini Atom Board S310162
- Figura 56: Tabla de resistencias a utilizar para protección de led
- Figura 57: Zumbador
- Figura 58: Relé de alta velocidad de Fujitsu
- Figura 59: Esquema de localización y aviso asociado al sistema de activación
- Figura 60: Curvas de fuerza-deformación reales y simuladas de las pruebas de carga: (a) lateral; (b) trasera
- Figura 61: Deformaciones máximas admisibles con el E2D-ROPS montado en el tractor John Deere: (a) ensayo lateral; (b) ensayo trasero
- Figura 62: Deformaciones máximas admisibles con el E2D-ROPS montado en el tractor Kubota: (a) ensayolateral; (b) ensayo trasero
- Figura 63: Localización de los puntos de bloqueo en el E2D-ROPS en la posición operativa: (a) situación de los puntos de bloqueo; (b) visualización del sistema desensamblado para observar las piezas; (c) sistema de bloqueo cerrado.
- Figura 64: Esquema de funcionamiento del sistema de bloqueo: (a) posición baja y estrecha; (b) posición intermedia; (c) fin del despliegue; (d) posición bloqueado.
- Figura 65: Curvas de presión-tiempo del inflador SHI2-20-614, construido por TRW (cortesía de TRW)
- Figura 66: Ensayos de despliegue del E2D-ROPS instalado en el tractor
- Figura 67: Despliegue del E2D-ROPS al llegar al ángulo de activación
- Figura 68a: Resultado del ensayo lateral de la AD-ROPS A en la EMA
- Figura 68b: Resultado del ensayo trasero de la AD-ROPS A en la EMA
- Figura 68c: Resultado del ensayo trasero de la AD-ROPS A en la EMA
- Figura 69: Representación del arco trasero, arco delantero, asiento y zona de seguridad
- Figura 70: Verificación de la interferencia de los volúmenes
- Figura 71: Incremento de tamaño del arco trasero y verificación de volumen
- Figura 72: Retraso del arco trasero y verificación de volumen
- Figura 73: Lugar geométrico de los puntos de anclaje de la AD-ROPS que garantiza un resultado positivo de los ensayos del Código 6
- Figura 74: Modelización del tractorista, en particular de los “ojos”.

- Figura 75a: Zona de interferencia de visión con el arco colocado lo más abajo posible
- Figura 75b: Zona de interferencia de visión con el arco colocado lo más arriba posible
- Figura 76: Representación en el sistema diédrico de la zona de visión
- Figura 77: Idiograma de operatividad del sistema
- Figura 78: Esquema de conexiones del sistema
- Figura 79: Algoritmo principal del microprocesador
- Figura 80: Algoritmo control de arranque
- Figura 81: Algoritmo control del conductor
- Figura 82: Algoritmo de detección del vuelco
- Figura 83: Algoritmo de activación del sistema
- Figura 84: Comprobación del microprocesador BX-35 con un sensor
- Figura 85: Prototipo de inclinando (a) cerrado; (b) abierto
- Figura 86: Prueba del inclinando en laboratorio al llegar a un ángulo determinado
- Figura 87: Localización del inclinando en el quad
- Figura 88: Secuencia del vuelco del quad (a) momentos previos al vuelco; (b) detección de vuelco efectivo y disparo de la AD-ROPS; (c) extensión completa de la AD-ROPS antes de contacto con el suelo; (d) contacto con el suelo de la AD-ROPS.

ANEXO 2

BIBLIOGRAFIA

- [] Alfaro, J.R. (2008). Sistematización de diseño de ROPS por elementos finitos y optimización de sus códigos de homologación en la OCDE. Tesis doctoral. Tudela Universidad Pública de Navarra
- [] Alfaro, J.R.; Arana, I.; Arazuri, S.; Jarén, C. (2010). Assessing the safety provided by SAE J2194 Standard and Code 4 Standard code for testing ROPS, using finite element analysis. *Biosystems Engineering* 105(2), 189-197
- [] Alkhaledi, K.; Means, K.; McKenzie Jr.; Smith, J. (2013). Reducing occupational fatalities by using NIOSH 3rd generation automatically deployable roll-over protective structure. *Safety Science* 51, 427-431.
- [] American Society of Agricultural Engineers (1967). S305. Operator protection for wheeled-type agricultural tractors.
- [] American Society of Agricultural Engineers (1974). S306. Protective frame for agricultural tractors – Test procedures and performance requirements.
- [] ANSI/ASABE. 2010. ANSI/ASABE S599 NOV 2010 Standardized Deployment Performance of an Automatically Deployable ROPS for Turf & Landscape equipment.
- [] Arana, J.I.; Jarén, C.; Arazuri, S.; Mangado, J.; Alfaro, J.R.; Ponce de León, J.L. (2008). Four Computer Programs to Design and Calculate Safety Structures for Old Agricultural Tractors Lacking ROPS. *Journal of Agricultural Machinery Science* 4(1), 45-50.
- [] Arana, J.I.; Mangado, J.; Arnal, P.; Arazuri, S.; Alfaro J.R.; Jarén, C. (2010). Evaluation of risk factors in fatal accidents in agriculture. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8(3), 592-598.
- [] Arana, J.I.; Alfaro, J.R.; Arazuri, S.; Ponce de León, J.L.; Jarén, C. (2011). A proposal to improve SAE Standard and OECD Code 4 Standard Code for testing ROPS. *Transactions of the ASABE* 54(4), 1189-1197.
- [] Arndt, J. F. (1971). Roll over protective structure for farm and construction tractors – a 50 years review. SAE Technical Papers Series, 710508, Warrendale, PA.
- [] Ayers, P.D.; Dickson, M.; Warner, S. (1994). Model to evaluate exposure criteria during roll-over protective structures (ROPS) testing. *Transactions of the ASAE* 37(6), 1763-1768.
- [] Ayers, P.D. (1997). ROPS Design for Pre-ROPS tractors. *Journal of Aeromedicine* 4(3/4), 309-311

- [] Ayers, P.D. (2003). Design and testing for agricultural tractors. Final performance report. NIOSH Paper No. 5-R01-OH003612-03. Atlanta, Ga.: NIOSH.
- [] Bafallui, A.; Morente, A. (2008). Análisis de los accidentes por vuelco de tractor en la región de Murcia. Boletín Servicio de Seguridad y Formación, Área Seguridad MN 23, septiembre. Instituto de Seguridad y Salud Laboral (ISSL). Murcia. Spain
- [] Barco Royo, E. (1999). Estudio de accidentes laborales en el sector agrario (I). COAG. Vida Rural. 15 de Noviembre de 1999, p 22-25.
- [] Bernhardt, J. H.; Langley, R.L. (1992). Accidental occupational farm fatalities in North Carolina; 1984-1988. The Journal of Rural Health 8(1), 60-69.
- [] Bernhardt, J. H.; Langley, R.L. (1999). Analysis of Tractor-related Deaths in North Carolina from 1979 to 1988. The Journal of Rural Health 15(3), 285-295.
- [] Buchele, W.F. (1962). The utility-roll bar. ASAE paper no. 62-632
- [] Bureau of Labor Statistics (BLS) (2000). National Census of occupational injuries. 1999. U.S. Department of Labor News, USDL 00-236.
- [] Bureau of Labor Statistics (BLS) (2006). Census of fatal occupational injuries. Washington, DC
- [] Caerols Pérez, J.J. (2010). Comentarios a la guerra de las Galias. (tr. César, Julio). Madrid: Alianza editorial S.A. pp. 249-250 (caes.gall.7.23). ISBN 978-84-206-4092-1.
- [] Casini-Ropa, G. (1980). Il trattore agricolo: Stato di sicurezza e sicurezza nell'impiego. [The agricultural tractor: safety state and safety in the use]. Machine e Motori Agricoli 2, 27-42.
- [] Chisholm, C.J. (1972). EA survey of 114 tractor sideways overturning accidents in the U.K. 1969-1971. Dep. Note DN/TE/238/1425, Nat. Inst. Agric. Engng, Silsoe, Apr. 1972 (unpubl.).
- [] Chisholm, C.J. (1979a). A mathematical model of tractor overturning and impact behavior. Journal of Agricultural Research 24, 375-394.
- [] Chisholm, C.J. (1979b). Experimental validation of a tractor overturning simulation. Journal of Agricultural Research 24, 395-415.
- [] Chisholm, C.J. (1979c). The effect of parameter variation on tractor overturning and impact behaviour. Journal of Agricultural Research, 24 417-440.

- [] Chisholm, C.J. (1979d). NIAE research in sideways overturning. Paper No. 4 in "Summary Proceedings of the Symposium on Engineering of Tractor Protective Structures". (Held at Strathmore Hotel, Luton, 18-20 May 1978) Report No. 31, National Institute of Agricultural Engineering, Silsoe, UK. ISSN 0077 4804
- [] Chisholm, C.J.; Dwyers, M.J.; Lines, J.A.; Whyte, R.T. (1992). Safety, health and hygiene in agriculture. *Safety Science* 15(4-6), 225-248.
- [] Cianotti, R. (2008). L'installazione dei sistemi di ritenzione del conducente nei trattori agricoli o forestali. Dipartimento Tecnologie di Sicurezza.
- [] Comer, R.S. (2005). Evaluation of engineering plastic for roll-over protective structure mounting. MS. Thesis. Knoxville. Tenn.: The University of Tennessee. Department of Biosystems Engineering and Soil Sciences.
- [] Comer, R.S.; Ayers, P.D.; Liu, J. (2007). Evaluation of engineering plastic for roll-over protective structure (ROPS) mounting. *Journal of Agricultural Safety and Health*, 13(2), 137-145.
- [] Crosbie, C.J. (1961). Tractor safety devices. *New Zealand Journal of Agriculture*, 75-87.
- [] Duncan, A. (1966). Anti-roll bars for tractors. U.S. Patent 3,244,251, April 5, 1966; filed on February 24, 1964; Issued on April 5, 1966. Application in Great Britain on June 14, 1963, no. 23,747/63
- [] Etherton, J.; McKenzie Jr., E.A.; Lutz, T.; Cantis, D.; Kau, T.Y. (2004). An initial farmer evaluation of a NIOSH AutoROPS prototype. *International Journal of Industrial Ergonomics* 34, 155-165.
- [] Etherton, J.R.; Ronaghi, M.; Current, R.S. (2007). Development of a pultruded FRP composite material ROPS for farm tractors. *Composite Structures* 78(2), 162-169.
- [] Fabri, A.; Ward, S. (2002). Validation of a Finite Element Program for the Design of Roll Over Protective Framed Structures (ROPS) for Agricultural Tractors. *Biosystems Engineering* 81(3), 287-296.
- [] Febo, P.; Pessina, D. (1989). Sicurezza ed ergonomia del trattore [Safety and comfort of the tractor]. *Machine e Motori Agricoli* 6/7, 27-60.
- [] Fenollosa, M. L.; Guadalajara, N. (2007). An empirical depreciation model for agricultural tractors in Spain. *Spanish Journal of Agricultural Research* 5(2), 130-141.
- [] Freeman, S.A. (1999). Potential Impact of a ROPS retrofit policy in Central Iowa. *Journal of Agricultural Safety and Health* 5(1), 11-18.

- [] Gamarra, J.L.; Blanco, G.; Chacón, F.; Gil Ribes, J.A. (2012). Diseño y desarrollo de un dispositivo activo, de seguridad frente al vuelco. 10º Congreso Internacional de Prevención de Riesgos Laborales. Mayo 2012, Bilbao (Spain).
- [] Gasparetto, E. (1968). Le cabine per le trattrici agricole. *Macchine e Motori Agricoli*, 1, 12-17
- [] Gasparetto, E.; Febo, P.; Pessina, D. (1987). OECD Standard codes for the official testing of agricultural tractors. Protective structures. Comparison of different test formulae. AGR/TS(87)24. Paris, France: OECD.
- [] Gasparetto, E.; Febo, P.; Pessina, D. (1987). Strutture di protezione per trattori: aspetti legislative, tecnici, normative ed applicative. *Macchine e Motori Agricoli* 11, 123-131.
- [] Gasparetto, E. (2002). ¿Nuevo tipo de bastidor de protección para los tractores? *Agrotécnica*, Agosto, 73-78.
- [] Gelhausen, P.C. (1991). Danger in the fields: tractor roll-over. *TRIAL MAGAZINE*, November 1991. (Can also be read on www.tractorlaw.com/Pages/danger.html)
- [] Gölbaşı (2002). The determination of the reasons and expected injury cost index of the occupational accidents resulted from using equipment-machinery and tractors being used in agriculture. Ph Thesis, Ankara University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Turkey, 260 pp.
- [] Goodman, R.A.; David Smith, J.D.; Sikes, R.K.; Rogers, D.L. (1965). Fatalities associated with farm tractor injuries: an epidemiologic study. *Public Health Reports* 100(3), 329-333
- [] Groothuis, M.; Kruckeberg, J.; Samba, A.; Shaver, Ch. (2009). Powered Foldable ROPS. Graduation Project. Department of Biosystems Engineering and Soil Science. University of Tennessee, Knoxville.
- [] Guarneri, A.; Liberati, P.; Ragni, L. (1993). Theoretical-experimental analysis of the energy applied to protective structures on narrow-track wheeled tractors in side overturning. *Rivista di Ingegneria Agraria* 24(1), 8-13.
- [] Guzzomi, A.L.; Rondelli, V.; Guarnieri, A.; Molari, G.; Molari, P.G. (2009). Available energy in the roll-over of narrow track wheeled agricultural tractors. *Journal of Biosystems Engineering* 104(3), 318-323.
- [] Hallman, E.M. (2005). Retrofitting measuring effectiveness of incentives and uncovering inherent barriers to success. *Journal of Safety and Health* 11(1), 75-84.

- [] Harris, J.R.; Mucino, V.H.; Etherton, J.R.; Snyder, K.A.; Means, K.H. (2000). Finite element modelling of ROPS in static testing and rear overturns. *Journal of Agricultural Safety and Health*. Aug 6(3), 215-25.
- [] Harris, J.R. (2008). Predicting the performance characteristics of assembled roll over protective structure designs for tractors. Phd. Thesis. West Virginia University
- [] Hathaway, L.; Kuhar, J. (1994). *Farm and ranch safety management*. Moline, IL: Deere and Company Service Publications
- [] Hopkins, R.B.; Walters, F.C. (1979). Comparison of roll-over protective structures (ROPS) test codes for wheeled agricultural tractors. Paper No. 6 in "Summary Proceedings of the Symposium on Engineering of Tractor Protective Structures". (Held at Strathmore Hotel Luton, 18-20 May 1978) Report No. 31, National Institute of Agricultural Engineering, Silsoe, UK. ISSN 0077 4804
- [] Huaier, F.D.; Fiorentino, J.A.; Orbe, G.; Volonté, P.R.; Buela. (2008). Lesiones por cinturón de seguridad en pediatría. *Rev. Argent. Cirug*, 95(3-4), 89-100
- [] Hunckler, C.J.; Purdy, R.J.; Austin, R.D. (1985). Nonlinear analysis of the Terex Scraper Roll-over Protective Cab. SAE Paper 850788
- [] INAIL (Istituto Nazionale Per l'Assicurazione Contro Gli Infortuni Sul Lavoro) (2000). Banca Dati Pubblicaa INAIL – Infortuni indennizzati in agricoltura a tuttoil 31 Dicembre 1999 per anno, evento, consequence, tipo de lavorazione e forma di avvenimento. [Accidents indemnified in agriculture up to December 31 1999 for year, event, consequences, type of working and type of event.] Monografie INAIL, Roma.
- [] INSHT (Instituto Nacional Seguridad e Higiene en el Trabajo). Nota Técnica de Prevención 259: Tractor agrícola: Prevención del vuelco
- [] ISO Standard 3471 (1986). *Earth Moving Machinery – Roll-Over Protective Structures. Laboratory tests and performance requirements*
- [] Jaren, C.; Mangado, T.; Arana, J.I.; Arnal, P.; Arazuri, S.; Garcia, M.J. (2008). Cinturón de seguridad para tractores agrícolas. Documento interno.
- [] Jaren, C.; Alfaro, J.R.; Arazuri, S.; Ponce de León, J.L.; Arana, J.I. (2009). Assessing roll-over safety provided by ROPs test following SAE standard J1194 versus OECD Code 4. *Transactions of the ASABE* 52, 1453-1460.
- [] Kamil, D.; Serafettin, D.; Guven, S.; Idris, D.; Gursel, G. (2010). Evaluation of Farm Tractor-Related Fatalities. *American Journal of Forensic Medicine & Pathology* 31(1), 64-68. doi: 10.1097/PAF.0b013e3181c21bf0

- [] Kawakami, M.; Ishida, E.; Yoshida, T.; Iwata, K.(1998). Non-linear large deformation analysis of tractor ROPS. Kubota Technical Report No. 34, 74-80. Japan.
- [] Kelsey, T.W.; May, J.J.; Jenkins, P. (1996). Farm tractors, and the use of seat belts and roll-over protective structures. American Journal of Industrial Medicine 30, 447-451.
- [] Kise, M.; Zhang, Q. (2006). Sensor-in-the-loop tractor stability control: Look-ahead attitude prediction and field tests. Computers and electronics in Agriculture 52, 107-118.
- [] Langle, T. (2012). Structures de protection abatables (Fold-over protective structures). Convention Cemagref CCMSA 2009-2012.
- [] LCEur 1974\61. Directiva 1974/150/CEE, de 4 marzo. Tractor agrícola o forestal. Aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre la homologación de los tractores agrícolas o forestales de ruedas. CONSEJO. DOL 28 marzo 1974, núm. 84, [pág. 10, Núm. Págs. 15].
- [] LCEur 1977\221. Directiva 1979/622/CEE, de 25 junio. Tractor. Aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre los dispositivos de protección en caso de vuelco de los tractores agrícolas o forestales de ruedas (pruebas estáticas). CONSEJO. DOL 17 julio 1979, núm. 179, [pág. 1, Núm. Págs. 30].
- [] LCEur 1977\240. Directiva 1977/536/CEE, de 28 junio. Tractor agrícola y forestal. Aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre los dispositivos de protección en caso de vuelco de los tractores agrícolas o forestales de ruedas. CONSEJO. DOL 29 agosto 1977, núm. 220, [pág. 1, Núm. Págs. 37].
- [] LCEur 2003\37. Directiva 1987/402/CEE, de 26 de mayo. Relativa a la homologación de los tractores agrícolas o forestales, de sus remolques y de su maquinaria intercambiable remolcada, así como de los sistemas, componentes y unidades técnicas de dichos vehículos y por la que se deroga la Directiva 74/150/CEE. CONSEJO. DOL 9 julio 2003, núm. 171, [pág. 1, Núm. Págs. 82].
- [] LCEur (2006) Directiva 2006/26/EC, de 2 de marzo. Modificando, para adaptarlas al progreso técnico, las directivas del Consejo 74/151/CEE, 77/311/CEE, 78/933/CEE and 89/173/CEE relativas a tractores de ruedas y forestales.

- [] MacCollum, D.V. (1984). Lessons from 25 years of ROPS. Professional Safety 29(1), 25-31.
- [] Mangado, J. (2006). Diseño, cálculo, construcción y ensayos de estructuras de protección al vuelco para tractores de ruedas. Tesis doctoral. Universidad Pública de Navarra.
- [] Mangado, J.; Arana, J.I.; Jarén, C.; Arazuri, S.; Arnal, P. (2007a). Design Calculation on Roll-over Structures for Agricultural Tractors. Biosystems Engineering 96(2), 181-191.
- [] Mangado, J.; Arana, J.I.; Jarén, C.; Arnal, P.; Arazuri, S.; Ponce de León, J.L. (2007b). Development and Validation of a Computer Program to Design and Calculate ROPS. Journal of Agricultural Safety and Health 13(1), 65-82.
- [] Márquez, L. (2012). Cuadernos de agronomía y tecnología. Tractores agrícolas. Tecnología y Utilización. B & H Editores. Madrid (Spain). I.S.B.N. 978-84-935183-5-6.
- [] Marzo Quintanilla, E. (2000). Brazo de seguridad antivuelco autodisparable para tractores. Oficina Española de Patentes y Marcas. Número de solicitud: 009600109.
- [] Marzo Quintanilla, E. (2013). Brazo de seguridad para vehículos agrícolas ligeros. Oficina Española de Patentes y Marcas. Número de solicitud: PCT/ES2012/070334.
- [] Maybrier, O. (1956). Safety guard for a tractor operator. US Patent 1956/2,729,462. filed on, July 28,1952; Issued on January 3, 1956.
- [] McKenzie Jr., E.A.; Etherton, J. (2002). NIOSH AutoROPS Latch and Release Mechanism: Second Generation. Paper no. IMECE2002-32458, 87-91. doi:10.1115/IMECE2002-32458.
- [] McKenzie Jr., E.A.; Etherton, J.; Harris, J.R.; Cantis, D.M.; Lutz, T.J. (2005). NIOSH AutoROPS Research to Practice: Zero Turn Commercial Mowers. Paper no. IMECE2005-81575 pp. 91-96.doi:10.1115/IMECE2005-81575
- [] MMWR. (1993). Public health focus: Effectiveness of roll-over protective structures for preventing injuries associated with agricultural tractors. Morbidity and Mortality Weekly Report (3), 57-59.
- [] Moberg H. A. (1954). Tractor Safety Cabs. Test methods and experiences gained during ordinary farm work in Sweden. National Swedish Testing Institute for Agricultural Machinery

- [] Moberg H.A. (1973). Dynamic Testing of tractor protection cabs: development of method, practical experiences. National combined farm construction and industrial machinery and fuels and lubricants meetings, New York, 13 September.SAE paper # 730761.
- [] Molari, G.; Rondelli, V. (2004). On the definition of narrow-track wheeled agricultural tractors. Biosystems Engineering 88(1), 75-80.
- [] Molari, G.; Rondelli, V. (2007). Evaluation criteria for the anchorage resistance of safety belts on agricultural tractors. Biosystems Engineering 97(2), 163-169.
- [] Murphy, J.D.; Yoder, A.M. (1998). Census of fatal occupational injury in the agriculture forestry and fishing industry. Journal of Agricultural Safety and Health, Special Issue 1, 55-56.
- [] Myers, J.R.; Snyder, K.A. (1995). Roll-over protective structure use and the cost of retrofitting tractors in the United States 1993. Journal of Agricultural Safety and Health 1995(1), 185–197.
- [] Myers, J.R. (2003). Tractor occupational safety and health update. Record of the tractor related injury and death meeting, Pittsburgh, PA, February 13-14, 2003, Morgantown, WV: National Institute of Occupational Safety and Health, 5-23.
- [] National Safety Council (NSC) (1992). Accident facts 1992. Itasca, Illinois: National Safety Council.
- [] National Safety Council (NSC) (1997). Accident facts 1997. Itasca, Illinois: National Safety Council.
- [] NIOSH (2004). National Agricultural Tractor Safety Initiative. National Institute of Occupational Safety and Health, Washington D.C., USA. January
- [] OECD Code 3 (1967). OECD standard code for the official testing of protective structures on agricultural and forestry tractors (dynamic test).
- [] OECD Code 3 (2011). OECD standard code for the official testing of protective structures on agricultural and forestry tractors (dynamic test). Organization for the Economic Co-operation and Development. Paris
- [] OECD Code 4 (2012). OECD standard code for the official testing of protective structures on agricultural and forestry tractors (static test). Organization for the Economic Co-operation and Development. Paris
- [] OECD Code 6 (2012). OECD standard code for the official testing of front mounted roll-over protective structures on narrow track wheeled agricultural and forestry tractors. Organization for the Economic Co-operation and Development. Paris

- [] OECD Code 7 (2012). OECD standard code for the official testing of rear mounted roll-over protective structure on narrow-track wheeled agricultural and forestry tractors. Organization for the Economic Co-operation and Development. Paris
- [] OECD AGR/CA/T (2007)7. Maximum masses of agricultural tractors in relation with protective structure tests. Paper submitted to the 2007 Annual Meeting by Spain.
- [] OECD AGR/CA/T (2011)4/REV1. Revised proposal to introduce an Upper Limit to the Mass Ratio in Code 4. Paris, France: OECD.
- [] OECD TAD/CA/T/A (2009)2. Crush test for seat belt anchorage. Madrid, Spain.
- [] OECD (2010). Progress report and outlook of scientific working group on improvement of OECD standard test codes for roll-over protective structures. OECD Document TAD/CA/RD (2010).Paris, France: OECD.
- [] Pessina, D.; Radovan, J. (1994). Simulation of the test on tractor protective structures using the finite elements analysis. XII World Congress on Agriculture Engineering (2). Milan, Italy, August 29 September 1 1993. Published by CIGR, General Secretariat; Merelbeke; Belgium.
- [] Ponce de León, J.L.; Alfaro, J.R.; Jarén, C.; Arana, I.; Arazuri, S. (2008). A new point of view on ROPS tests modifications: Rationale. Paper to the OECD TWG on updating the Codes, Nebraska, October 2008.
- [] Poojary, M.R.; Sashidar, D.S.; Darekar, S.; Sajanapwar, Dr. (2006). Model to evaluate exposure criteria during tractor roll-over protective structures (ROPS) testing. Innovation through simulation. Altair CAE Conference. Bangalore. India.
- [] Powers J.R.; Harris, J.R.; Etherton, J.R.; Snyder, K.A.; Ronaghi, M.; Newbraugh, B.H. (2000). Performance of an automatically deployable ROPS on ASAE tests. Journal of Agricultural Safety and Health 7(1), 51–61
- [] Powers, J.R.; Harris, J.R.; Etherton, J.R.; Ronaghi, M.; Snyder, K.A.; Lutz, T.J.; Newbraugh, B.H. (2001). Preventing tractor roll-over facilities: performance of the NIOSH AutoROPS. Injury Prevention 2001(7), i54-i58.
- [] Purschwitz, M.; Field, W. (1990). Scope and magnitude of injuries in the agricultural work place. American Journal of Industrial Medicine, 18(2), 179-192.
- [] Rains, G.C. (2000). Initial roll-over effectiveness evaluation of an alternative seat belt design for agricultural tractors. Journal of Agricultural Safety and Health 6, 13-27.

- [] Real Decreto 1215/97 de 18 de julio de 1997 por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo. BOE nº 188 07-08-1997
- [] Rees, W.D. (1965). Agricultural Tractor Accidents. A description of 14 tractor accidents and a comparison with road traffic accidents. British Medical Journal 1965(2), 63-66
- [] Rehkugler, G.E.; Kumar, V.; Davis, D.C. (1975). Simulation of tractor accidents and overturns. Transactions of ASAE 19 (4), 604-609/613. ASAE Paper No. 75-1047
- [] Rondelli, V.; Guzzomi, A.L. (2010) .Selecting ROPS safety margins for wheeled agricultural tractors based on tractor mass. Biosystems Engineering 105(3), 402-410.
- [] Rohner, S.; Janish, M.; Lang, J.; Schulte, M.; Menne, G.; Liessaus, F. (2010). Protection device in motor vehicles for protecting individuals. U.S. Patent 2010/0171296A1, July 8, 2010; filed on April 3, 2007; Issued on April 21, 2009.
- [] Ross, B.; Di Martino, M. (1982). Roll-over protective structures. Their history and development. Professional Safety 27(5), 15-23
- [] Rusinski, E. (1987). Computer aided methods in designing of tractor safety cabs. Grundlagen der Landtechnik 37(1), 17-20.
- [] SAE Standards. (1968). J334: Protective frame test procedures and performance requirements. Warrendale, Pa.: Society of Automotive Engineers.
- [] SAE Standards. (1970). J334a: Protective frame test procedures and performance requirements. Warrendale, Pa.: Society of Automotive Engineers.
- [] SAE Standards (1977). J1194: Roll-over protective structures (ROPS) for wheeled agricultural tractors. Warrendale, Pa.: Society of Automotive Engineers
- [] SAE Standards (1997). J2194: Roll-over protective structures (ROPS) for wheeled agricultural tractors. Warrendale, Pa.: Society of Automotive Engineers.
- [] SAE Standards (1999). J1194: Roll-over protective structures (ROPS) for wheeled agricultural tractors. Warrendale, Pa.: Society of Automotive Engineers.
- [] Scarlett, A.; Reed, J.N. (2009). Investigation of roll-over protective structures (ROPS): Test criteria for larger agricultural tractors. SRL Contract Report No. 3214. Thetford, U.K.: Scarlett Research, Ltd.
- [] Schwanghart, H. (1973). Rechnerischer Festigkeitsnachweis Von Umsturzsicherheitsrahmen zur Schleppernachrüstung. Institut Technischen für Landmaschinen. Universidad de Munich.
- [] Schwanghart, H. (1978). Univ. T. Munchen. Grundl. Landtechnik, Bd. 28.

- [] Sheehan, R.T. (1992). Counter balanced telescopic Rollbar for Tractors. U.S. Patent 1992/5129676, 2010; filed on February 19, 1991; Issued on July14, 1992.
- [] Silleli, H. (2006). The development of a system increasing the driver safety and driving performance in front mounted roll-over protective structures. *Journal of Agricultural Machinery Science* 2(1), 41-48.
- [] Silleli, H.; Dayıoğlu, M.A.; Gultekin, A.; Ekmekci, K.; Yildiz, M.A.; Akay, E.;Saranli, G. (2007). Anchor Mechanism to increase the Operator Clearance Zone on Narrow-track Wheeled Agricultural Tractors: Prototype and first tests. *Biosystems Engineering* 97, 153-161.
- [] Silleli, H.; Dayıoğlu, M.A.; Gultekin, A; Saranli, G.; Yildiz, M.A.; Akay, E.; Ekmekci, K. (2008). Anchor Mechanism to increase the Operator Clearance Zone on Narrow-track Wheeled Agricultural Tractors: Static and Field Upset Test Results. *Biosystems Engineering* 99, 196-204
- [] Sniezek, J.; Horiagon, T. (1989) Medical-examiner reported fatal occupational injuries, North Carolina, 1978-1984. *American Journal of Industrial Medicine*, 15(6), 669-678.
- [] Sollberger, R.; Wust, W. (1975). TraktormitJ och-Bugell. CH Patentschrift 559 646
- [] Springfieldt, B.; Thorpson, J.; Lee, B.C. (1998). Sweden's thirty-year experience with tractor rollovers. *Journal of Agricultural Safety and Health* 4(3), 173-180.
- [] Stockton, A.D.; O'Neill, D.H.; Hampson, C.P. (2002). Methods for optimising the effectiveness of roll-over protective systems. Contract Research Report 425/2002.HSE Books, 1-131 ISBN 0 7176 2330 0.
- [] Thelin, A. (1998). Roll-over fatalities: Nordic perspectives. *Journal of Agricultural Safety and Health* 4(3), 157-160.
- [] Tiwari, P.S.; Gite, L.P.; Kot L.S.; Dubey, A.K. (2004). Overall assessment of tractor related injuries in Central India. *International Agricultural Engineering Journal* 13(4), 135-144.
- [] Villanueva, M.A. (2011). Informe técnico sobre las condiciones ergonómicas en la colocación del arco de seguridad en tractores. Servicio de Higiene Industrial y Salud Laboral de la Consejería de Educación, Formación y Empleo de la Reunión de Murcia

- [] Wardill, G.A. (1979).The use of a large deflection finite element program in cab impact calculations. Paper No. 8 in "Summary Proceedings of the Symposium on Engineering of Tractor Protective Structures". (Held at Strathmore Hotel, Luton, 18-20 May 1978) Report No. 31, National Institute of Agricultural Engineering, Silsoe, UK.ISSN 0077 4804
- [] Wen, D.; Hetzel, J.H.; Wilson, J.H. (1994). Finite element analysis of Axle Housing Strength for Pre-ROPS John Deere 720 Tractor.ASAE Technical Paper No. 94-5002.
- [] Yeh, R.E.; Huang, Y.; Johnson, E.L. (1976). An Analytical Procedure for the Support of ROPS Design. SAE Paper 760690.

ANEXO 3

ARTICULO 1

*Development and tests of an automatically deployable, in height
and width, front-mounted ROPS for narrow-track tractors*

Biosystems Engineering - 2013

Este artículo ha sido eliminado por restricciones de derechos de autor

ANEXO 4

PREMIO ARTICULO 1

European Society of Agricultural Engineers

EurAgEng Outstanding Paper Awards 2014



**European Society of Agricultural Engineers
EurAgEng Outstanding Paper Awards 2014**

Sponsored by IAgrE

**E2D-ROPS: Development and tests of an automatically deployable,
in height and width, front-mounted ROPS for narrow-track tractors.**

by

**Tomás Ballesteros, Ignacio Arana,
Amaya Pérez Ezcurdia, José R Alfaro**

which appeared in

Biosystems Engineering 116 (1), pages 1-14, 2013,

has been selected as a winner of the
2014 EurAgEng Outstanding Paper Awards announced at AgEng2014
Zurich, Switzerland

*The President and Executive of EurAgEng, the Editors and Editorial Board of
Biosystems Engineering, and IAgrE congratulate the authors on the quality of their
paper, and wish them continuing success with their research and its publication.*

Robert Kaufmann
President of EurAgEng

Bill Day
Editor-in-Chief
Biosystems Engineering

ANEXO 5

ARTICULO 2

*Development and validation of automatically deployable ROPS
(AD-ROPS) based on airbag inflators technology*
Biosystems Engineering - 2014

Este artículo ha sido eliminado por restricciones de derechos de autor